

T 229: Grundlagenversuche zum Verhalten von Konstruktionsleicht-
beton unter Brandbeanspruchung. 3. Teil.

T 229: Grundlagenversuche zum Verhalten von Konstruktionsleicht-
beton unter Brandbeanspruchung. 3. Teil.

Dieser Forschungsbericht ist eine mit modernsten Hochleistungskopierern vom IRB Verlag auf Einzelanfrage hergestellte Kopie des reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeiteten Originalmanuskripts des Forschers.

© Copyright by IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des IRB Verlags.

IRB Verlag

Informationszentrum RAUM und BAU
der Fraunhofer-Gesellschaft
Nobelstraße 12, D-7000 Stuttgart 80
Telefon (0711) 68 68-500
Telefax (0711) 68 68-507
Telex 7 255 167 irb d

Grundlagenversuche zum Verhalten von
Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung

- 3. Teil -

B e r i c h t

erstattet von

Dipl.-Ing. Lore Krampf

und

Dipl.-Min. Wulf Schwick

Juli 1973

Die Arbeiten wurden im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung,
Bauwesen und Städtebau (Az. I 7 - 81 07 05 - 122/3) durchgeführt.

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Brand- und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstr. 1
D-38106 Braunschweig

T229

Inhaltsübersicht

Seite

1. Allgemeines; Zweck der Untersuchungen	3
2. Versuchsplanung und Vorbereitung der Brandversuche	4
2.1 Baustoffe	4
2.1.1 Blähschiefer	4
2.1.2 Blähton	4
2.2 Prüfkörper	5
2.2.1 Konstruktion und Abmessungen	5
2.2.2 Lagerung und Trocknung	6
2.2.3 Übersicht der durchgeführten Versuche	6
3. Versuchsaufbau und Durchführung der Brandversuche	8
3.1 Brandraum und Beheizung	8
3.2 Einbau und Belastung der Versuchswände	8
3.3 Messungen während der Versuche	9
3.4 Sonstige Beobachtungen während der Versuche	9
4. Versuchsergebnisse der Brandversuche	9
4.1 Versuchskörper 1	9
4.2 Versuchskörper 2	10
4.3 Versuchskörper 3	10
4.4 Versuchskörper 4	10
4.5 Versuchskörper 5	11
4.6 Versuchskörper 6	11
4.7 Versuchskörper 7	12
4.8 Versuchskörper 8	12
4.9 Versuchskörper 9	12
4.10 Versuchskörper 10	13
4.11 Versuchskörper 11	13
4.12 Versuchskörper 12	14
4.13 Versuchskörper 13	14
4.14 Versuchskörper 14	14
4.15 Versuchskörper 15	15
4.16 Versuchskörper 16	15
4.17 Versuchskörper 17	16
4.18 Versuchskörper 18	16
4.19 Versuchskörper 19	17
4.20 Versuchskörper 20	17

	Seite
5. Zusammenstellung der Ergebnisse aller Brandversuchsreihen	18
6. Abschätzung der Ursachen des Abplatzens von Konstruktions- leichtbeton	22
6.1 Spannungen durch ausströmenden Wasserdampf	23
6.2 Spannungen durch ungleichmäßige Erwärmung des Querschnitts . .	26
6.3 Spannungen aus unterschiedlicher Dehnung von Bewehrung und Beton	27
6.4 Einflußmöglichkeiten von hydrostatischem Wasserdampfdruck . . .	29
6.5 Abplatzungen durch Volumenvergrößerung der Zuschläge	30
6.6 Spannungen aus unterschiedlicher Dehnung von Zuschlagkorn und Mörtelmatrix	31
6.7 Zusammenfassung der ermittelten Einflüsse auf das Abplatzen von Konstruktionsleichtbeton	33
7. Schlußbetrachtungen; Folgerungen für die Praxis	34
Verzeichnis der Literatur	37
Verzeichnis der Anlagen	39
Verzeichnis der Bilder	40

1. Allgemeines; Zweck der Untersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprogramms "Grundlagenversuche zum Verhalten von Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung bei Verwendung als Konstruktions- oder Vorsatzbeton unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse beim Schutzbau" führte das Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig im Auftrage des Bundesministers für Städtebau und Wohnungswesen bereits zwei Versuchsreihen über das Abplatzverhalten von Konstruktionsleichtbeton unter einachsiger Druckbeanspruchung durch, über die im Juni 1969 [1] und im Dezember 1970 [2] dem Auftraggeber Bericht erstattet wurde.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit ergänzenden Untersuchungen, die wiederum vom Bundesministerium für Städtebau und Wohnungswesen finanziert wurden. Es handelt sich um die Klärung vermuteter mineralogischer Umwandlungsprozesse, die das Abplatzverhalten geblähter Zuschlagstoffe beeinflussen könnten, sowie um die Durchführung einer weiteren Brandversuchsreihe an wandartigen Elementen unter einachsiger Druckbeanspruchung.

Bei den Brandversuchen wurden variiert:

Prüfkörperabmessungen
Zuschlagstoff
Feuchtegehalt
Bewehrung
Druckspannung
Wärmebeanspruchung

Es wurden insgesamt 20 Prüfkörper untersucht.

2. Versuchsplanung und Vorbereitung der Brandversuche

2.1 Baustoffe

2.1.1 Blähschiefer

Als Zuschlagstoff für den zu untersuchenden Konstruktionsleichtbeton wurde das Fabrikat **N o r l i t** der Firma Nordcement A.G., Hannover, aus dem Werk Hoiersdorf gewählt. Der Blähschiefer wird aus gebrochenem Kulmschiefer im Drehofen nach dem Gegenstromverfahren gewonnen.

Der Mischung wurde ein Anteil von 5 Vol.-% Quarzfeinsand 0 - 0,2 (Herkunft Firma Schlingmeier, Rhode/Elm) zugesetzt.

Alle Zuschläge wurden in trockenem Zustand verarbeitet.

Als Zement wurde ein PZ 350 F der Firma Alemannia, Höver, verwendet.

Der untersuchte Beton hatte folgende Daten:

Mischungsaufbau

Zement PZ 350 F	365 kg/m ³
Wasser	256 "
Quarzfeinsand 0 - 0,2	131 "
Norlit 0 - 3	300 "
" 3 - 7	183 "
" 7 - 15	221 "
" 15 - 25	185 "
w/z =	0,70

Trockenrohdichte $\rho_{tr} = 1,39$

Betongüte LB 300

2.1.2 Blähton

Als Zuschlagstoff für den zu untersuchenden Konstruktionsleichtbeton wurde das Fabrikat **L e c a** der Firma Georg von Giesches Erben, Hamburg, gewählt. Der Blähton wird im Drehofen nach dem Gegenstromverfahren gewonnen.

Der Mischung wurde ein Anteil von 5 Vol.-% Quarzfeinsand 0 - 0,2 (Herkunft Firma Schlingmeier, Rhode/Elm) zugesetzt.

Alle Zuschläge wurden in trockenem Zustand verarbeitet.

Als Zement wurde ein PZ 350 F der Firma Alemannia, Höver, verwendet.

Der untersuchte Beton hatte folgende Daten:

Mischungsaufbau

Zement Z 350 F	330 kg/m ³
Wasser	182 "
Quarzfeinsand 0 - 0,2	131 "
Leca 0 - 3	348 "
" 3 - 7	172 "
" 7 - 15	186 "
w/z =	0,55
<u>Trockenrohdichte</u> ρ_{tr} =	1,17

Betongüte LB 225

2.2 Prüfkörper

2.2.1 Konstruktion und Abmessungen

Die Größe der Prüfkörper wurde den Abmessungen des verfügbaren Brandhauses und der Belastungseinrichtung angepaßt. Die Maße der wandartigen Elemente betrugen:

$$l = 0,80 \text{ m}$$

$$h = 0,80 \text{ m}$$

Die Versuchskörperdicke wurde variiert zwischen $d = 8, 10$ und 12 cm .

Ein Teil der Wände wurde beidseitig mit einer leichten geschweißten Bau-stahlmatte (Q 92) gemäß Anlage 1 bewehrt. Ein anderer Teil erhielt eine konzentrierte Bewehrung aus St IIIb gemäß Anlage 2. Der Rest blieb unbe-wehrt.

2.22 Lagerung und Trocknung

Die Prüfkörper wurden in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd das Normklima 20/65 aufwies.

Die angegebenen Feuchtigkeitsgehalte in Gew.-% wurden durch Trocknung von Leichtbetonproben, die den Versuchskörpern entsprachen, bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz ermittelt.

2.23 Übersicht der durchgeführten Versuche

Die Versuche wurden nach folgendem Programm, das im einzelnen erst nach den Ergebnissen der jeweils vorangegangenen Versuche festgelegt wurde, durchgeführt.

T a f e l 1

(siehe Seite 7)

T a f e l 1

Vers. Nr.	Zu- schlag- stoff	Beton- festig- keit	Wand- dicke cm	Bewehrung	Feuchte Gew.-%	Druck spannung kp/cm ²	Beheizung
1	Leca	LB 225	8	-	4,75	80	einseitig
2	"	"	8	-	4,75	40	beidseitig
3	"	"	8	-	4,75	20	beidseitig
4	"	"	10	-	4,0	80	einseitig
5	"	"	10	-	4,0	80	beidseitig
6	"	"	10	-	4,0	40	beidseitig
7	"	"	12	-	5,5	40	beidseitig
8	"	"	12	-	5,25	80	beidseitig
9	"	"	12	-	4,5	100	beidseitig
10	"	"	10	BStG gem. Anl. 1	4,5	80	einseitig
11	"	"	10	BStG gem. Anl. 1	4,5	80	beidseitig
12	"	"	10	St III gem. Anl.2	4,75	80	beidseitig
13	"	"	12	BStG gem. Anl. 1	4,5	80	beidseitig
14	"	"	12	BStG gem. Anl. 1	4,5	40	beidseitig
15	"	"	12	St III gem. Anl.2	4,5	80	beidseitig
16	Norlit	LB 300	10	St III gem. Anl.2	5,5	100	beidseitig
17	"	"	10	St III gem. Anl.2	5,5	100	einseitig
18	"	"	12	BStG gem. Anl. 1	3,75	100	beidseitig
19	"	"	12	BStG gem. Anl. 1	3,75	50	beidseitig
20	"	"	12	St III gem. Anl.2	3,75	50	beidseitig

3. Versuchsaufbau und Durchführung der Brandversuche

3.1 Brandraum und Beheizung

Zur Versuchsdurchführung diente ein Brandhaus mit den lichten Abmessungen

$$L = 1,55 \text{ m}$$

$$B = 1,05 \text{ m}$$

$$H = 1,50 \text{ m},$$

in dessen Längsachse ein Belastungsgerüst zur Aufnahme der Probekörper eingebaut wurde. Durch die Maßnahmen zur Abschirmung des Gerüsts gegen übermäßige Wärmeeinwirkung wurde die lichte Höhe des Brandraumes auf 0,70 m verkleinert. Die innere Ausmauerung des Brandraumes bestand aus Gasbeton. Oben wurde das Brandhaus mit Gasbetonplatten abgedeckt. In der rückwärtigen Brandraumwand befanden sich zwei Abzüge.

Die Beheizung nach der Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102 erfolgte unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 52 603.

Bei einseitiger Beheizung wurde ein Ölbrenner benutzt, dessen Flammenachse horizontal etwa in halber Höhe des freien Teils des Prüfkörpers verlief. Die Flammenlänge betrug 0,8 bis 1,0 m. Bei beidseitiger Beheizung wurde ein zweiter Ölbrenner auf der anderen Seite des Prüfkörpers in der gleichen Art wie der beschriebene installiert.

Das Brandhaus ist in Anlage 3 dargestellt.

3.2 Einbau und Belastung der Versuchswände

Die Versuchskörper wurden in einen stählernen Belastungsrahmen so eingebaut, daß sie oben und unten gelenkig gehalten waren. Die Seitenränder waren nicht geführt. Durch den oberen Rahmenriegel wurde die Kraft zweier 100 Mp-Pressen auf die Prüfstücke übertragen. Die Kraftschlüssigkeit des Systems wurde durch zwei Stahlspindeln, die das Oberhaupt gegen den unteren Riegel verankerten, hergestellt.

Die Stahlteile des Belastungsrahmens und die Pressen wurden durch Gasbetonsteine, Perliteschüttung und Vermitectapplatten vor übermäßiger Wärmeeinwirkung geschützt. Durch diese Maßnahme wurde die der Beflammung ausgesetzte freie Höhe der Prüfwände auf 70 cm eingeschränkt.

Bei den Maßverhältnissen der zu prüfenden Wände von $h/d = 80/\geq 8 \leq 10$ war ein Ausknicken nicht zu erwarten.

Der Versuchsaufbau ist in Anlage 3 und der Belastungsrahmen zusätzlich auf Bild 1 dargestellt.

3.3 Messungen während der Versuche

Die Messung der Brandraumtemperatur erfolgte in halber freier Wandhöhe, 10 cm von den Prüfstücken entfernt, mittels zweier NiCr-Ni-Thermoelemente, die von oben in den Brandraum geführt waren.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum wurde durch Kompensographen registriert.

3.4 Sonstige Beobachtungen während der Versuche

Das Verhalten der Versuchskörper wurde während der Versuche dauernd kontrolliert; insbesondere wurden Betonabplatzungen und Feuchtigkeitsaustritt beobachtet.

4. Versuchsergebnisse der Brandversuche

4.1 Versuchskörper 1: Leca, $d = 8$ cm; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,75$ Gew.-%; aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung einseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 21. Versuchsminute an wurde Feuchtigkeit auf der dem Feuer abgekehrten Wandseite beobachtet; nach 44 Versuchsminuten war die Wand abgetrocknet.

Betonabplatzungen traten nicht auf.

Der Versuch wurde nach 60 min beendet.

Nach Versuchsende wurde die Belastung des Probekörpers bis zum Bruch gesteigert; dieser trat bei einer aufgetragenen Druckspannung von $p = 104 \text{ kp/cm}^2$ ein.

4.2 Versuchskörper 2: Leca, $d = 8 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,75 \text{ Gew.-%}$; aufgetragene Druckspannung $\sigma = 40 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Nach 22 Versuchsminuten brach der Prüfkörper ohne vorherige Anzeichen plötzlich zusammen.

4.3 Versuchskörper 3: Leca, $d = 8 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,75 \text{ Gew.-%}$; aufgetragene Druckspannung $\sigma = 20 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

In der 6. Versuchsminute trat eine geringe oberflächliche Abplatzung mit der Flächenausdehnung $\varnothing \sim 3 \text{ cm}$ auf.

Ohne weitere vorherige Anzeichen brach der Prüfkörper nach 29 Versuchsminuten plötzlich zusammen.

4.4 Versuchskörper 4: Leca, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,0 \text{ Gew.-%}$; aufgetragene Druckspannung $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung einseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 28. Versuchsminute bis zum Versuchsende wurde geringer Feuchtigkeitsaustritt auf der dem Feuer abgekehrten Wandseite beobachtet.

Betonabplatzungen traten nicht auf.

Der Versuch wurde nach 60 min beendet.

Nach Versuchsende wurde die Belastung des Prüfkörpers bis zum Bruch gesteigert; dieser trat bei einer aufgetragenen Druckspannung von $p = 112 \text{ kp/cm}^2$ ein.

4.5 Versuchskörper 5: Leca, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,0 \text{ Gew.-%}$; aufgetragene Druckspannung $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 4. Versuchsminute an wurde geringe Feuchtigkeitsabgabe beobachtet.

In der 20. Versuchsminute erfolgten schalenartige Abplatzungen auf beiden Wandseiten, und nach 21 Minuten brach der Prüfkörper nach einer weiteren Abplatzung zusammen.

4.6 Versuchskörper 6: Leca, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,0 \text{ Gew.-%}$; aufgetragene Druckspannung $\sigma = 40 \text{ kp/cm}^2$, Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Es wurde kein wesentlicher Feuchtigkeitsaustritt beobachtet.

Nach 40 Versuchsminuten brach der Probekörper ohne vorherige Anzeichen plötzlich mit lautem Knall zusammen.

4.7 Versuchskörper 7: Leca, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 5,5 \text{ Gew.-%}$;
aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 40 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung
beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Es wurde kein wesentlicher Feuchtigkeitsaustritt beobachtet.

Betonabplatzungen traten nicht auf.

Der Versuch wurde nach 60 min beendet.

Nach Versuchsende wurde die Belastung des Prüfkörpers bis zum Bruch gesteigert; dieser trat bei einer aufgebrachten Druckspannung von $\sigma = 95 \text{ kp/cm}^2$ ein.

4.8 Versuchskörper 8: Leca, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 5,25 \text{ Gew.-%}$;
aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung
beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Es wurde kein wesentlicher Feuchtigkeitsaustritt beobachtet.

Betonabplatzungen traten nicht auf.

Der Versuch wurde nach 60 min beendet.

Nach Versuchsende wurde die Belastung des Prüfkörpers bis zum Bruch gesteigert; dieser trat bei einer aufgebrachten Druckspannung von $\sigma = 95 \text{ kp/cm}^2$ ein.

4.9 Versuchskörper 9: Leca, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung -; Feuchtigkeit $\sim 4,5 \text{ Gew.-%}$;
aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 100 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung
beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Es wurde kein wesentlicher Feuchtigkeitsaustritt beobachtet.

Betonabplatzungen traten während des Brandversuchs nicht auf.

Der Versuch wurde nach 60 min beendet.

Etwa 3 min nach dem Ausschalten der Brenner und der Entlastung des Prüfkörpers erfolgte eine große schalenartige Abplatzung.

4.10 Versuchskörper 10: Leca, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung BStG; Feuchtigkeit
~ 4,5 Gew.-%; aufgebrachte Druckspannung $\sigma =$
 80 kp/cm^2 ; Beheizung einseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 11. Versuchsminute an wurde Feuchtigkeit auf der dem Feuer abgekehrten Wandseite beobachtet.

In der 11. Versuchsminute platzte die hintere feuerseitige Längskante des Versuchskörpers ab; weitere Abplatzungen in diesem Bereich erfolgten in der 18. und 20 Minute. In der 23. Minute platzte auf der Feuerseite eine große Schale ab, und die Bewehrung wurde freigelegt. Daraufhin wurde der Versuch abgebrochen, obgleich die Tragfähigkeit des Prüfkörpers noch nicht erschöpft war.

Bild 2 zeigt den Probekörper nach dem Versuch.

4.11 Versuchskörper 11: Leca, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung BStG; Feuchtigkeit
~ 4,5 Gew.-%; aufgebrachte Druckspannung $\sigma =$
 80 kp/cm^2 ; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

In der 8. Versuchsminute wurde eine Verfärbung des Prüfkörpers infolge Feuchtigkeit festgestellt. In der 13. Minute trat etwas Wasser aus großen Poren aus.

In der 18. Versuchsminute erfolgten die ersten Abplatzungen, durch die der Versuchskörper sofort zusammenbrach.

Bilder 3 und 4 zeigen den Probekörper nach dem Versuch.

4.12 Versuchskörper 12: Leca, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung St III; Feuchtigkeit
~ 4,75 Gew.-%; aufgebrachte Druckspannung
 $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Nach 7 Versuchsminuten wurde eine leichte Dunklerfärbung des Prüfkörpers durch Feuchtigkeit beobachtet. Zur selben Zeit war ein Knistern hörbar. Ohne weitere vorherige Anzeichen brach der Prüfkörper nach 29 Versuchsminuten plötzlich mit lautem Knall zusammen.

Bild 5 zeigt den Probekörper nach dem Versuch.

4.13 Versuchskörper 13: Leca, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung BStG; Feuchtigkeit
~ 4,5 Gew.-%; aufgebrachte Druckspannung
 $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 17. bis zur 28. Versuchsminute wurde Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet.

In der 31. Versuchsminute trat eine große, schalige, einseitige Abplatzung auf, wodurch der Prüfkörper versagte (Lastabfall in den Pressen).

Bild 6 zeigt den Probekörper nach dem Versuch.

4.14 Versuchskörper 14: Leca, $d = 12 \text{ cm}$, Bewehrung BStG; Feuchtigkeit
~ 4,5 Gew.-%; aufgebrachte Druckspannung
 $\sigma = 40 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 15. bis zur 28. Versuchsminute wurde Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet.

In der 30. Versuchsminute trat eine einseitige schalige Abplatzung auf, die die Bewehrung freilegte. Die Bewehrung verformte sich sofort. Aus der Bruchfläche wurden laufend Betonbrocken herausgesprengt. In der 33. Minute platzte eine weitere große Schale ab. Daraufhin wurde der Versuch abgebrochen, obgleich die Tragfähigkeit des Prüfkörpers noch nicht erschöpft war.

Bild 7 zeigt den Probekörper nach dem Versuch.

4.15 Versuchskörper 15: Leca, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung St III, Feuchtigkeit $\sim 4,5 \text{ Gew.-%}$; aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 80 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

In der 23. Versuchsminute wurde geringer Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet.

Betonabplatzungen traten nicht auf.

Der Versuch wurde nach 60 min beendet.

15 Stunden nach Versuchsende wurde die Belastung des Probekörpers bis zum Bruch gesteigert; dieser trat bei einer aufgebrachten Druckspannung von $\sigma = 124 \text{ kp/cm}^2$ ein.

4.16 Versuchskörper 16: Norlit, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung St III; Feuchtigkeit $\sim 5,5 \text{ Gew.-%}$; aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 100 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 9. Versuchsminute an wurde geringer Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet.

In der 15. Versuchsminute erfolgte eine Abplatzung an der vorderen Längskante des Prüfkörpers und in der 17. Minute eine ähnliche an der hinteren Längskante. Aus den Bruchflächen wurden fortlaufend weitere Betonbrocken herausgesprengt.

In der 24. Minute platzten auf beiden Seiten Schalen ab, und die Bewehrung wurde freigelegt. In der 26. Minute versagte der Prüfkörper (Lastabfall in den Pressen).

Bilder 8 und 9 zeigen den Probekörper nach dem Versuch.

4.17 Versuchskörper 17: Norlit, $d = 10 \text{ cm}$; Bewehrung St III; Feuchtigkeit $\sim 5,5 \text{ Gew.-%}$; aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 100 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung einseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 19. Versuchsminute an wurde Feuchtigkeitsaustritt auf der nicht beflamten Seite des Prüfkörpers beobachtet.

In der 12. Versuchsminute platzte die hintere feuerseitige Längskante des Probekörpers ab. In der 14. Minute erfolgte eine große schalige Abplatzung auf der beflamten Seite. Aus der Bruchfläche wurden fortlaufend Betonbrocken herausgesprengt. In der 19. Minute wurde der Mittelbügel der Bewehrung sichtbar. In der 21. Minute wurde die Vertikalbewehrung freigelegt und bog sofort aus. In der 26. Versuchsminute brach der Prüfkörper zusammen.

Bild 10 und 11 zeigen den Probekörper nach dem Versuch.

4.18 Versuchskörper 18: Norlit, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung BStG; Feuchtigkeit $\sim 3,75 \text{ Gew.-%}$; aufgebrachte Druckspannung $\sigma = 100 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

In der 11. Versuchsminute wurde Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet. In der 16. Minute wurde eine Dunklerfärbung infolge Feuchtigkeit festgestellt. Bis zur 20. Minute war der Prüfkörper weitgehend abgetrocknet.

In der 25. Versuchsminute trat eine einseitige schalige Abplatzung auf, wodurch die Bewehrung sichtbar wurde. Aus der Bruchfläche wurden laufend weitere Betonbrocken herausgesprengt. In der 27. Minute erfolgte auch auf der anderen

Prüfkörperseite eine schalige Abplatzung. In der 28. Minute bog sich der freigelegte Stahl aus. Bis zur 30. Minute wurden fortlaufend weitere Abplatzungen auf beiden Seiten beobachtet. Nach 30 min wurde der Versuch abgebrochen, obgleich die Tragfähigkeit des Prüfkörpers noch nicht erschöpft war.

Bilder 12 und 13 zeigen den Probekörper nach dem Versuch.

4.19 Versuchskörper 19: Norlit, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung BStG; Feuchtigkeit

$\sim 3,75 \text{ Gew.-%}$; aufgebrachte Druckspannung

$\sigma = 50 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 11. bis zur 27. Versuchsminute wurde geringer Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet.

In der 51. Minute brach der Prüfkörper ohne vorherige Anzeichen plötzlich zusammen.

4.20 Versuchskörper 20: Norlit, $d = 12 \text{ cm}$; Bewehrung St III; Feuchtigkeit

$\sim 3,75 \text{ Gew.-%}$; aufgebrachte Druckspannung

$\sigma = 50 \text{ kp/cm}^2$; Beheizung beidseitig.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102; geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im zulässigen Toleranzbereich.

Von der 16. bis zur 30. Versuchsminute wurde geringer Feuchtigkeitsaustritt aus großen Poren beobachtet.

In der 55. Minute brach der Probekörper ohne vorherige Anzeichen plötzlich zusammen.

5. Zusammenstellung der Ergebnisse aller Brandversuchsreihen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Brandversuche an wandartigen Elementen unter einachsiger Druckbeanspruchung zusammengestellt, wobei auch die in [1] und [2] beschriebenen Versuche herangezogen werden. Dabei wird zunächst die Einteilung unbewehrt-bewehrt und einseitig beflammt - beidseitig beflammt vorgenommen.

Die durchlaufende Numerierung entspricht nicht Tafel 1 und Abschnitt 4.

T a f e l 2 (vgl. Anlage 4)

unbewehrte, einseitig beflamnte Prüfkörper

Lfd. Nr.	Zuschlagstoff	Betonfestigkeit	Rohdichte ⁺ [kg/dm ³]	Feuchte Gew.-%	Vol.-%	Wanddicke [cm]	Druckspannung [kp/cm ²]	Ergebnis
1	detoon	LB 450	1,32	6,75	8,9	10	100	32' Abplatzung 54' Bruch
2	detoon	LB 450	1,32	6,75	8,9	10	50	20' Abplatzung 43' Bruch
3	detoon	LB 450	1,32	6,75	8,9	10	25	32' Abplatzung 60' Versuchsende
4	detoon	LB 450	1,32	4,75	6,3	10	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
5	detoon	LB 450	1,32	4,75	6,3	10	130	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
6	Norlit	LB 300	1,39	7,75	10,8	10	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
7	Norlit	LB 300	1,39	4,25	5,9	10	50	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
8	Norlit	LB 300	1,39	4,25	5,9	10	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
9	Norlit	LB 300	1,39	3,25	4,5	10	120	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
10	Leca	LB 225	1,17	4,0	4,7	10	80	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
11	Norlit	LB 300	1,39	5,25	7,3	8	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
12	Norlit	LB 300	1,39	8,5	11,9	8	100	15' Abplatzung 23' Bruch
13	Leca	LB 225	1,17	4,75	5,6	8	80	keine Abplatzg. 60' Versuchsende

+ in Abänderung von [1] und [2] sind hier die Trockenrohdichten angegeben.

T a f e l 3 (vgl. Anlage 5)
unbewehrte, zweiseitig beflamnte Prüfkörper

Lfd. Nr.	Zuschlag- stoff	Betonfe- stigkeit	Roh- dichte [kg/dm ³]	Feuchte		Wand- dicke [cm]	Druck- spannung [kp/cm ²]	Ergebnis
				Gew.-%	Vol.-%			
14	Norlit	LB 300	1,39	5,5	7,6	12	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
15	Norlit	LB 300	1,39	8,5	11,9	12	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
16	Norlit	LB 300	1,39	5,0	6,9	12	120	keine Abplatzg. 34' Bruch
17	Leca	LB 225	1,17	5,5	6,4	12	40	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
18	Leca	LB 225	1,17	5,25	6,1	12	80	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
19	Leca	LB 225	1,17	4,5	5,3	12	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
20	detoorn	LB 450	1,32	4,75	6,3	10	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
21	Norlit	LB 300	1,39	7,75	10,8	10	100	keine Abplatzg. 42' Bruch
22	Norlit	LB 300	1,39	4,25	5,9	10	100	keine Abplatzg. 44' Bruch
23	Norlit	LB 300	1,39	3,25	4,5	10	120	26' Abplatzungen 30' Versuchsende
24	Leca	LB 225	1,17	4,0	4,7	10	80	20' Abplatzungen 21' Bruch
25	Leca	LB 225	1,17	4,0	4,7	10	40	keine Abplatzg. 40' Bruch
26	Norlit	LB 300	1,39	5,25	7,3	8	50	27' Abplatzungen 29' Bruch
27	Leca	LB 225	1,17	4,75	5,6	8	40	keine Abplatzg. 22' Bruch
28	Leca	LB 225	1,17	4,75	5,6	8	20	keine Abplatzg. 29' Bruch

T a f e l 4 (vgl. Anlage 6)
bewehrte, einseitig beflamnte Prüfkörper

Lfd. Nr.	Zuschlagstoff/ Bewehrung	Betonfestigkeit	Rohdichte [kg/dm ³] _{tr}	Feuchte Gew.-% Vol.-%		Wanddicke [cm]	Druckspannung [kp/cm ²]	Ergebnis
29	Norlit/ BStG	LB 300	1,39	6,0	8,3	10	100	26' Abplatzung 30' Versuchsende
30	Norlit/ St III	LB 300	1,39	5,5	7,5	10	100	12' Abplatzung 26' Bruch
31	Leca/ BStG	LB 225	1,17	4,5	5,3	10	80	11' Abplatzung 23' Versuchsende

T a f e l 5 (vgl. Anlage 7)
bewehrte, zweiseitig beflamnte Prüfkörper

Lfd. Nr.	Zuschlagstoff/ Bewehrung	Betonfestigkeit	Rohdichte [kg/dm ³] _{tr}	Feuchte Gew.-% Vol.-%		Wanddicke [cm]	Druckspannung [kp/cm ²]	Ergebnis
32	Norlit/ BStG	LB 300	1,39	3,75	5,2	12	100	25' Abplatzung 30' Versuchsende
33	Norlit/ BStG	LB 300	1,39	3,75	5,2	12	50	keine Abplatzung 51' Bruch
34	Norlit/ St III	LB 300	1,39	3,75	5,2	12	50	keine Abplatzung 55' Bruch
35	Leca/ BStG	LB 225	1,17	4,5	5,3	12	80	keine Abplatzung 31' Bruch
36	Leca/ BStG	LB 225	1,17	4,5	5,3	12	40	30' Abplatzung 33' Versuchsende
37	Leca/ St III	LB 225	1,17	4,5	5,3	12	80	keine Abplatzung 60' Versuchsende
38	Norlit/ St III	LB 300	1,39	8,75	12,2	10	100	keine Abplatzung 60' Versuchsende
39	Norlit/ BStG	LB 300	1,39	7,25	10,1	10	75	8' Abplatzg. 24' Bruch
40	Norlit/ BStG	LB 300	1,39	6,0	8,3	10	100	14' Abplatzg. 25' Versuchsende
41	Norlit/ St III	LB 300	1,39	5,5	7,6	10	100	15' Abplatzg. 26' Bruch
42	Norlit/ St III	LB 300	1,39	4,25	5,9	10	100	keine Abplatzg. 60' Versuchsende
43	Leca/ St III	LB 225	1,17	4,75	5,6	10	80	keine Abplatzg. 29' Bruch
44	Leca/ BStG	LB 225	1,17	4,5	5,3	10	80	18' Abplatzung 18' Bruch

Aus der Zusammenstellung, besonders den Anlagen 4 - 7 werden folgende Tendenzen deutlich:

- einseitig beflammte Prüfkörper verhalten sich günstiger als beidseitig beflammte;
- Prüfkörper mit hohem Feuchtegehalt sind abplatzgefährdeter als trockenere;
- bewehrte Prüfkörper zeigen stärkere Tendenz zum Abplatzen als unbewehrte;
- bei dickeren Prüfkörpern treten Abplatzungen seltener auf als bei dünnen;
- signifikante Unterschiede im Verhalten der verschiedenen Zuschlagstoffe sind nicht festzustellen;
- ein wesentlicher Einfluß der aufgetragenen Druckspannung ist im Bereich der untersuchten Proben nicht festzustellen;
- früh einsetzende Abplatzungen (früheste Beobachtung in der 11. Versuchsminute) führen im allgemeinen erst nach häufig sich wiederholenden Abplatzungen zum Versagen des Prüfkörpers;
- in späteren Versuchsstadien (Beobachtungen in der 34. bis 55. Versuchsminute) wurde plötzliches Zusammenbrechen der Versuchskörper beobachtet;
- einmal einsetzende Abplatzungen kommen im allgemeinen nicht mehr zur Ruhe sondern führen zum Bruch.

6. Abschätzung der Ursachen des Abplatzens von Konstruktionsleichtbeton

Nach neuesten Untersuchungen von Meyer-Ottens [3] sind die Ursachen des explosionsartigen Abplatzens von Normalbeton unter Brandbeanspruchung in folgendem zu suchen:

1. Durch ausströmenden Wasserdampf werden an den Porenwandungen Reibungskräfte erzeugt, die zu Zugspannungen im Beton führen.
2. Durch ungleichmäßige Erwärmung des Querschnitts entstehen Eigenspannungen, deren Größe die Beton-Zugfestigkeit sehr bald überschreiten und zu plötzlicher Rißbildung vom Querschnittsinneren (bei zweiseitiger Beflammung) her führen.
3. Bei bewehrten Querschnitten werden durch den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Beton und Stahl Zwängungsspannungen - radiale Druckspannungen und tangentielle Zugspannungen - an der Stahloberfläche erzeugt.
4. Eine Spannungsüberlagerung erfolgt durch äußere Belastungen, wobei es sich gezeigt hat, daß hohe Druckspannungen ungünstig wirken.
5. Abplatzungen werden hervorgerufen durch einen räumlichen Spannungszustand, der bei Anwesenheit aller oder mehrerer der vorgenannten Faktoren aufgebaut wird.
6. Hydrostatischer Wasserdampfdruck wird als Ursache von explosionsartigen Abplatzungen ausgeschlossen.

Die Ursachen des Abplatzens von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge sind vermutlich ähnlich wie beim Normalbeton. Im folgenden wird untersucht, wie sich die Verhältnisse aufgrund anderer Materialeigenschaften ändern und ob weitere Ursachen in Betracht zu ziehen sind.

Über die Materialkennwerte selbst - insbesondere den temperaturbedingten Abfall des E-Moduls, die Wärmeausdehnung im Bereich hoher Temperaturen sowie Porositätsdaten - müssen hier Annahmen getroffen werden, da Grundlagenuntersuchungen noch fehlen. Die folgenden Berechnungen können daher nicht mehr als größenordnungsmäßige Abschätzungen sein.

6.1 Spannungen durch ausströmenden Wasserdampf

Meyer-Ottens ermittelt als Hauptursache des Abplatzens von Normalbeton Betonzugspannungen, die durch Reibung an den Porenwandungen bei laminar ausströmendem Wasserdampf entstehen. Ihre Größe gibt er wie folgt an:

$$\sigma_f = \frac{8\pi\eta f \rho_{\text{Bet}} V_{100} \rho_{\text{H}_2\text{O}} X}{10^3 \bar{P} \rho_{\text{Dampf}}} \cdot \sum_{r_n}^{r_m} \frac{A_{\text{laminar}}}{r_n}; \text{ mit}$$

n = dynamische Zähigkeit des Dampfes = $2,18 \cdot 10^{-12}$ kp min/cm²

f = Feuchte des Betons (Gew.-%)

V_{100} = Geschwindigkeit der Verdampfungsfront (cm/min)

X = Eindringtiefe der Verdampfungsfront (cm)

\bar{P} = Porosität (%)

ρ_{Dampf} = Dampfdichte = $0,58 \text{ kg/m}^3$

$\sum_{r_n}^{r_m} \frac{A_{\text{lam.}}}{r_n}$ = Anzahl der Poren, in denen eine laminare Strömung stattfinden kann (1/cm²)

ρ_{Bet} und $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ in (kg/m³)

Bei einer entsprechenden Ermittlung für Leichtbeton aus geblähten Zuschlagstoffen ist man derzeit noch auf grobe Schätzungen angewiesen, da über Gesamtporosität und Porengrößenverteilung keine Untersuchungen vorliegen.

Weigler und Karl [4] geben die Porosität von geblähten Leichtzuschlagstoffen wie folgt an:

Norlit	40 - 55 %
Leca	45 - 75 %
detoon	45 - 55 %

Die Porosität des Zementsteins kann - z. B. nach Romberg [5] - zu rd. 45 - 50 % angenommen werden.

Vernachlässigt man den Einfluß der Beimengung von 5 Vol.-% Quarzfeinsand an den verwendeten Leichtbetonmischungen, so kann die Gesamtporosität grob angenommen werden zu

$$\bar{P} \sim 50 \%$$

Bestimmungen der Porengrößenverteilung, die Waubke [6] an Norlit-Leichtzuschlag durchführte, zeigen innerhalb der hier interessierenden Porengrößen ($r \geq 0,075 \mu$) erhebliche Streuungen. Wertet man Messungen, die jeweils etwa mittlere Werte für die einzelnen Kornfraktionen darstellen, aus, so ergeben sich Porenanzahlen mit $r \geq 0,075 \mu$ wie folgt:

Körnung	0 - 3	$\sum_{r_n}^{r_m} A_{\text{laminar}}$	$\sim 11,9 \cdot 10^8$	Stck/cm ²
"	3 - 7	"	$\sim 7,6 \cdot 10^8$	"
"	7 - 15	"	$\sim 4,5 \cdot 10^8$	"
"	15 - 25	"	$\sim 3,7 \cdot 10^8$	"

Setzt man die von Meyer-Ottens angegebene Normalbetonporenzahl

$$\sum_{r_n}^{r_m} A_{\text{lam}} = 3,9 \cdot 10^8 \text{ Stck/cm}^2$$

stellvertretend für die Mörtelmatrix (Zement + Quarzfeinsand), so läßt sich - mit allen Vorbehalten - die Porenzahl des hier verwendeten Norlit-Betons ermitteln.

T a f e l 6

Porenzahl $\sum A_{\text{laminar}}$ für einen Norlit-Beton

Bestandteil	Anteil an der Mischung		Porenzahl	gewichtete Porenzahl
	1	Vol.-%	$\sum_{r_n}^{r_m} A_{\text{lam}}$ 10 ⁸ /cm ²	10 ⁸ /cm ²
Zement	118	20	3,9	0,78
Quarzfeinsand	50			
Norlit 0 - 3	182	22	11,9	2,62
Norlit 3 - 7	133	16	7,6	1,22
Norlit 7 - 15	180	22	4,5	0,99
Norlit 15 - 25	165	20	3,7	0,74
				$\sum_{r_n}^{r_m} A_{\text{lam}} = 6,35 \cdot 10^8/\text{cm}^2$

Die Betonzugspannung infolge Wasserdampfströmung kann nunmehr in Abhängigkeit von f , ρ_{Bet} , V_{100} und x ausgedrückt werden

$$\sigma_f = \frac{8 \pi \cdot 2,18 \cdot 10^{-12} \cdot 1000 \cdot 6,35 \cdot 10^8}{10^3 \cdot 50 \cdot 0,58} \cdot f \cdot \rho_{\text{Bet}} \cdot V_{100} \cdot x$$

$$= 1,2 \cdot 10^{-3} f \cdot \rho_{\text{Bet}} \cdot V_{100} \cdot x \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

Die weitere Abschätzung wird am Beispiel des Prüfkörpers 23 (Versuchskörper g in [1]) durchgeführt. Auf Anlage 8 ist die Temperatur im Querschnitt zum Zeitpunkt des Beginns der Abplatzungen dargestellt. Nach 26 Versuchsminuten ist die Verdampfungsfront etwa 4 cm in den Querschnitt eingedrungen. Somit:

$$V_{100} = \frac{4}{26} = 0,154 \text{ cm/min}$$

$$x = 4 \text{ cm; weiterhin}$$

$$\rho_{\text{Bet}} = 1390 \text{ kg/m}^3$$

$$f = 3,3 \text{ Gew.-%}$$

Zum Zeitpunkt des Versagens dürften in diesem Prüfkörper infolge Wasserdampfströmung Zugspannungen folgender Größenordnung geherrscht haben:

$$\sigma_f = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 3,3 \cdot 1390 \cdot 0,154 \cdot 4 = 3,4 \text{ kp/cm}^2$$

Diese Spannung ist im Vergleich zum Normalbeton sehr gering.

Als zweites Beispiel möge der Prüfkörper 39 (Versuchskörper 6 in [2]) dienen. Er hatte besonders hohen Feuchtegehalt, und die Abplatzungen setzten früh (zum frühesten beobachteten Zeitpunkt), nach 8 Versuchsminuten ein. Damit war auch die Geschwindigkeit der Verdampfungsfront relativ groß.

$$\rho_{\text{Bet}} = 1390 \text{ kg/m}^3$$

$$f = 7,25 \text{ Gew.-%}$$

$$x = 2,5 \text{ cm (nach Versuchsprotokoll)}$$

$$t = 8 \text{ min}$$

$$V_{100} = 0,31 \text{ cm/min}$$

$$\sigma_f = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 7,25 \cdot 1390 \cdot 0,31 \cdot 2,5 = 9,4 \text{ kp/cm}^2$$

Es zeigt sich, daß auch hier - bei sehr ungünstigen Feuchteverhältnissen - die auftretende Zugspannung gering ist.

Die durch ausströmenden Wasserdampf entstehenden Betonzugspannungen können demzufolge beim Leichtbeton aus geblähten Zuschlagstoffen nicht als Hauptursache des explosionsartigen Abplatzens unter Feuerangriff angesehen werden.

Diese Aussage ist zu überprüfen, wenn Untersuchungen über Porositätsdaten und Porengrößenverteilungen von Konstruktions-Leichtbetonen vorliegen.

6.2 Spannungen durch ungleichmäßige Erwärmung des Querschnitts

Die Länge der Risse, die beim Überschreiten der Betonzugfestigkeit infolge Eigenspannungen aus ungleichmäßiger Erwärmung entstehen, wird von Meyer-Ottens angegeben zu:

$$x_r = \frac{b}{2} \left[0,25 \pm \sqrt{0,25^2 + 0,50 - \frac{3 \beta_z}{2 E_{(xr)} \cdot \alpha_T (T_R - T_m)}} \right] ; \text{ mit}$$

β_z = Betonzugfestigkeit

$E_{(x_r)}$ = E-Modul des Betons am Reißende, temperaturbedingt

α_T = Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons

T_R = Temperatur am Prüfkörpertrand

T_m = Temperatur in Prüfkörpermitte

für einen beidseitig beflamnten Prüfkörper, gemessen von Mitte Prüfkörper. Diese Formel kann auch für Konstruktionsleichtbeton angewendet werden. Dabei sollen die folgenden Annahmen getroffen werden:

LB 300

$$\rho_{tr} = 1,4 \text{ t/m}^3$$

$$\beta_z = 0,23 \sqrt[3]{\beta_{ws}^2} = 2,22 \text{ N/mm}^2 \hat{=} 22,2 \text{ kp/cm}^2 \text{ nach CEB-Lightweicht Manual [7]}$$

$$E_o = 110.000 \text{ kp/cm}^2 \text{ nach den Richtlinien [8]}$$

$$\alpha_T = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1} \text{ nach Heufers [9]}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_R = 550 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_m = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \text{ z. B. zum Zeitpunkt des Versagens im Prüf-} \\ \text{körper 23 (Versuchskörper g in [1]) vorhanden} \\ \text{bei einer Prüfkörperdicke } d = 10 \text{ cm (vergl.} \\ \text{Anl. 8).}$$

Über die Veränderung des E-Moduls von Leichtbetonen unter erhöhter Temperatur ist bisher wenig bekannt. Untersuchungen von Harmathy und Berndt [10] lassen die Vermutung zu, daß der Abfall des E-Moduls in Temperaturabhängigkeit nicht wesentlich anders verläuft als bei Normalbeton. Es wird daher der von Meyer-Ottens angesetzte Verlauf

$$E = E_0 (1,03 - 1,32 \cdot 10^{-3} T)$$

übernommen. Die Rißlänge für ein 10 cm dickes Leichtbetonelement ergibt sich dann zu

$$x_r = 0,85 \div 0,90 \frac{b}{2}.$$

Vergleicht man damit die von Meyer-Ottens angegebenen Rißlängen

$$x_r = 0,81 \frac{b}{2} \text{ bei } 8 \text{ cm dicken Elementen und}$$

$$x_r = 0,84 \frac{b}{2} \text{ bei } 12 \text{ cm dicken Elementen,}$$

so scheint - unter Vorbehalt der nicht genügend gesicherten Materialwerte - ein etwas ungünstigeres Verhalten des Leichtbetons vorzuliegen.

6.3 Spannungen aus unterschiedlicher Dehnung von Bewehrung und Beton

Die Ringzugspannungen, die entstehen, wenn sich ein Stahlstab bei Erwärmung stärker ausdehnt als der umgebende Beton, können nach Timoshenko [11] ermittelt werden. Meyer-Ottens hat danach folgende Formel entwickelt:

$$\sigma_{Rz} = \frac{\frac{\Delta \alpha_T \cdot \Delta T}{1 + \mu_B}}{\frac{E_B}{1 + \mu_B} + \frac{1 - \mu_{St}}{E_{St}}} ; \text{ mit}$$

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_T &= \text{Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten} \\ &\quad \text{von Stahl und Beton} \\ \Delta T &= \text{Temperaturerhöhung in Bewehrungsebene} \\ \mu_B &= \text{Querdehnzahl von Beton} \\ \mu_{St} &= \text{Querdehnzahl von Stahl} \\ E_B &= \text{E-Modul des Betons in Bewehrungsebene, temperaturbed.} \\ E_{St} &= \text{E-Modul der Bewehrung, temperaturbedingt}\end{aligned}$$

Diese Formel ist selbstverständlich auch für Stahlleichtbeton gültig. Folgende Annahmen werden für die Spannungsermittlung getroffen:

$$\begin{aligned}\alpha_{TB} &= 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1} \text{ nach Heufers [9]} \\ \alpha_{TSt} &= 11 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1} \\ \Delta T &= 350 - 20 = 330 \text{ grd, z. B. zum Zeitpunkt des Versagens} \\ &\quad \text{im Prüfkörper 23 (Versuchskörper g in [1]) in der ge-} \\ &\quad \text{dachten Bewehrungsebene vorhanden bei einer Prüfkör-} \\ &\quad \text{perdicke } d = 10 \text{ cm (vgl. Anl. 8).} \\ \mu_B &= 0,2 \text{ nach Heufers [9]} \\ \mu_{St} &= 0,3 \\ E_o &= 110.000 \text{ kp/cm}^2 \text{ nach den Richtlinien [8] für einen} \\ &\quad \text{Leichtbeton mit } \rho_{tr} = 1,4 \text{ t/m}^3 \\ E_B &= E_o (1,03 - 1,32 \cdot 10^{-3} T) \text{ nach Meyer-Ottens [3]} \\ E_{St} &= 2,12 \cdot 10^6 - 804 T\end{aligned}$$

Die Ringzugspannungen ergeben sich damit zu

$$\sigma_{Rz} = 60 \text{ kp/cm}^2.$$

Das bedeutet, daß die Zugfestigkeit von Konstruktionsleichtbetonen weit überschritten ist und Risse im Bereich der Bewehrung auftreten müssen. Allerdings ist diese Formel stark von der Lage der Bewehrung - mehr oder weniger tief im Beton eingebettet - abhängig. Der oben angegebene Wert gilt für einen Abstand der Stabachse vom beflamten Betonrand $a = 1,5 \text{ cm}$. Bei tiefer im Beton liegender Bewehrung nimmt die Ringzugspannung ab. Die Prüfkörperdicke gewinnt erst bei tiefer eingebettetem Stahl an Bedeutung, da ΔT in Oberflächennähe nicht so stark von der Dicke beeinflusst wird.

Das deutlich schlechtere Verhalten bewehrter Prüfkörper gegenüber unbewehrten kann durch die vorstehenden Ausführungen erklärt werden.

6.4 Einflußmöglichkeiten von hydrostatischem Wasserdampfdruck

Aus den Versuchsergebnissen ist allgemein abzuleiten, daß Prüfkörper mit hohem Feuchtigkeitsgehalt abplatzgefährdeter sind als trockenere. Einmal einsetzende Abplatzungen kommen in der Regel nicht mehr zur Ruhe sondern führen zum Bruch. Diese Sachverhalte lassen die Vermutung zu, daß schnell expandierender Wasserdampf eine mögliche Ursache für die Betonzerstörung sein kann.

Unter 6.1 wurde gezeigt, daß die Spannungen, die der strömende Wasserdampf erzeugt, im Vergleich zum Normalbeton gering sind. Dampfströmungen hoher Geschwindigkeit können jedoch nur bei hohem Druckgefälle entstehen. Während im Normalbeton nach Waubke [12] und Meyer-Ottens [3] diese enorm hohen hydrostatischen H_2O -Drucke aufgrund der homogenen Verteilung der Porosität keine Abplatzungen verursachen, liegen die Verhältnisse in einem Leichtbeton grundsätzlich anders. Hier existieren eine homogene Mörtelmatrix mit einer gleichmäßig verteilten Porosität neben einzelnen, von einer relativ dichten "Haut" umschlossenen Zentren hoher Porosität, den Blähton- bzw. Blähschieferkörnern.

Bei ausreichend hoher Aufheizgeschwindigkeit und entsprechend hoher Wassersättigung des Zuschlages können von diesen Zuschlagkörnern große hydrostatische Wasserdampfdrucke entwickelt werden. Aus Anlage 9 geht hervor, daß bei einem Porenfüllungsgrad von 5 Vol.-% mit H_2O , entsprechend einer Gasdichte von $\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$ bei 500°C ein hydrostatischer H_2O -Druck ca. 150 Bar entwickelt wird (Dampfdrucke von H_2O nach G. W. Kennedy [13]).

Daß hydrostatische H_2O -Drucke in der Größenordnung von 50 bis 300 Bar in Einzelporen Abplatzungen verursachen können, wurde von Bache und Isen [14] gezeigt. In ihren Versuchen wurden die über einbetonierte Gummibällchen aufbrachten Drucke gemessen, die zu Abplatzungen führten (Anl. 10). Diese Untersuchungen ergaben folgende in Anl. 11 wiedergegebene Beziehung zwischen dem hydrostatischen Druck in einer Pore und der Zugspannung im Beton gegenüber dem Abstand der Pore zur Betonoberfläche und dem Porendurchmesser:

$$\frac{p}{\sigma_z} = 0,3 + 9,5 \frac{h}{d} ; \text{ mit}$$

p = hydrostatischer Druck (Bar \triangleq kp/cm²)

σ_z = Betonzugspannung (kp/cm²)

h = Abstand der Porenoberfläche von der Betonoberfläche (mm)

d = Porendurchmesser (mm)

gültig für den Bereich $0,07 < \frac{h}{d} < 0,90$.

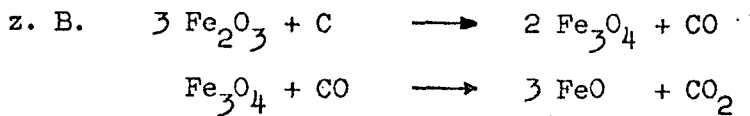
Aus diesen Gesetzmäßigkeiten folgt z. B., daß ein als "Pore" angesehenes Blähtonkorn vom Durchmesser $d = 15$ mm und einem H₂O-Füllungsgrad von nur 3 Vol.-% bei 400 °C einen H₂O-Druck von $p \sim 90$ Bar entwickelt. Bei einem Abstand $h = 5$ mm zur Betonoberfläche entsteht daraus eine Betonzugspannung von $\sigma_z \sim 30$ kp/cm². Berücksichtigt man, daß auf der einen Seite die Betonzugfestigkeit bei 400 °C mit Sicherheit weit unter 30 kp/cm² liegt und wesentlich höhere Wassergehalte im Beton bei den Abplatzversuchen festgestellt wurden, zum anderen aber geringe Wasserdampfmengen durch die Porosität der Mörtelmatrix bei langsamer Aufheizgeschwindigkeit vorzeitig entweichen können, so erscheint dieser Mechanismus der Dampfdruckentwicklung eine plausible Erklärung für das Abplatzverhalten von Konstruktionsleichtbeton unter Brandeinwirkung zu sein.

6.5 Abplatzungen durch Volumenvergrößerung der Zuschläge

Abplatzungen an Leichtbetonen unter Feuereinwirkung lassen zunächst den Verdacht aufkommen, die Zuschlagstoffe, seien es nun Blätone oder Blähschiefer, könnten durch ein mögliches "Nachblähen" die Ursache hierfür sein. Betrachtet man jedoch den Vorgang des Blähens gewisser blähfähiger Tonarten unter Einfluß hoher Temperaturen, so muß dieser Verdacht wieder fallengelassen werden.

Für das Blähvermögen von Tonen und Schiefen sind deren Gehalte an Fe₃O₄, Fe₂O₃, an organischen Substanzen und CaCO₃ von maßgeblicher Bedeutung (vgl. [15] und [16]). Daneben muß der Ton bzw. der Schiefer bei Temperaturen

von 1200 bis 1300 °C in den pyroplastischen Zustand übergehen. Als hauptsächliche Blähgasquellen sind die Redoxreaktionen zwischen den Eisenoxiden und dem Kohlenstoff der organischen Substanzen anzusehen.



Die thermische Dissoziation von Calcit und Dolomit in Oxide und CO₂ dürfte nur untergeordnete Bedeutung haben.

Vergleicht man nun diese Voraussetzungen, die zum Blähvermögen von Tonen notwendig sind, mit den Temperaturen von 300 - 600 °C, welche während der Abplatzversuche in Oberflächenschichten der Leichtbetonplatten nach 10 bis 40 Versuchsminuten auftreten können, so muß man erkennen, daß ein Zusammenhang zwischen dem Abplatzverhalten von Leichtbetonen und einem möglichen Nachblähen von Zuschlagstoffen nicht bestehen kann.

6.6 Spannungen aus unterschiedlicher Dehnung von Zuschlagkorn und Mörtelmatrix

Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Wärmedehnung von Mörtelmatrix und Zuschlagstoff auf die Eigenschaften von Normalbeton sind schon verschiedentlich durchgeführt worden, z. B. von Wischers [17]. Wählt man als Modell ein Kugelelement, so entstehen in der Berührungsfläche zwischen Zuschlagkorn und Zementstein theoretisch die Tangentialspannungen σ_t und die Radialspannungen σ_r .

$$\sigma_t = \frac{\Delta T (\alpha_{TK} - \alpha_{TM})}{2 \left[\left(\frac{b^3 - a^3}{b^3 + 2a^3} \right) \cdot \left(\frac{1 - 2\mu_K}{E_K} + \frac{\mu_M}{E_M} \right) + \frac{1 - \mu_M}{2E_M} \right]} ;$$

$$\sigma_r = - \frac{\Delta T (\alpha_{TK} - \alpha_{TM})}{\left(\frac{b^3 + 2a^3}{b^3 - a^3} \right) \cdot \left(\frac{1 - \mu_M}{2E_M} \right) + \frac{\mu_M}{E_M} + \frac{1 - 2\mu_K}{E_K}} ; \text{ mit}$$

- ΔT = Temperaturerhöhung in betrachtetem Element
 α_{TK} = Wärmeausdehnungskoeffizient des Zuschlags
 α_{TM} = Wärmeausdehnungskoeffizient des Mörtels
 μ_K = Querdehnzahl des Zuschlags
 μ_M = Querdehnzahl des Mörtels
 E_K = E-Modul des Zuschlags, temperaturbedingt
 E_M = E-Modul des Mörtels,
 b = Radius des Zuschlagskorns + umgebender Mörtelschale
 a = Radius des Zuschlagskorns

Die hier besonders interessierenden Tangentialspannungen werden beim Leichtbeton mit den Annahmen

$$\begin{aligned}\alpha_{TK} &= 3,5 + 6 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1} \text{ nach Weigler und Karl [4]} \\ \alpha_{TM} &= 10 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1} \text{ nach Weigler und Karl [4]}\end{aligned}$$

zu Druckspannungen. Sie haben also die umgekehrte Tendenz wie alle vorher untersuchten Einflüsse und dürfen daher als Ursache des explosionsartigen Abplatzens ausgeschlossen werden.

Betrachtet man das bisher nicht untersuchte Phänomen des plötzlichen Zusammenbruchs einiger Prüfkörper in einem späteren Versuchsstadium (34. bis 55. Versuchsminute), so ergibt sich folgende Situation für einen 10 cm dicken Prüfkörper nach 40 min Versuchsdauer:

$$\begin{aligned}\Delta T &\sim 400 \text{ grad (gemittelt über den Querschnitt)} \\ \mu_K &= \mu_M = 0,2 \\ E_{OK} &= 50.000 \div 110.000 \text{ kp/cm}^2 \text{ nach Weigler und Karl [4]} \\ E_K &\sim 80.000 \cdot (1,03 - 1,32 \cdot 10^{-3} T) = 40.000 \text{ kp/cm}^2 \\ E_{OM} &\sim 260.000 \text{ kp/cm}^2 \text{ nach Locher und Wischers [18]} \\ E_M &= 260.000 \cdot (1,03 - 1,32 \cdot 10^{-3} T) = 130.000 \text{ kp/cm}^2 \\ a &= 0,5 \text{ cm} \\ b &= 0,6 \text{ cm} \quad \text{) angenommene Mittelwerte} \\ \sigma_t &= - 160 \text{ kp/cm}^2\end{aligned}$$

Dieser Wert für zusätzliche Druckspannungen im Mörtelgerüst ist mit Sicherheit zu hoch; Spannungen dieser Größenordnung würden z. B. bei einem auf i. M. 400 °C erwärmten LB 300 schon ohne zusätzlich aufgebrachte Lasten immer zum Bruch führen. Das ist in den Versuchsreihen aber keineswegs der Fall gewesen.

Es ist zu berücksichtigen, daß bei der durchgeführten Berechnung nur grobe Mittelwerte eingesetzt werden konnten und daß vor allem gewisse "Warmkriech"-Einflüsse nicht erfaßbar sind.

Im Gegensatz zum Normalbeton wird beim Leichtbeton die Kraftübertragung im wesentlichen vom Mörtelgerüst übernommen, das erheblich steifer als die Zuschlagskörner ist. Die Hauptspannungsrichtung ist gleichlaufend mit der Richtung der oben ermittelten Gefügespannungen (vgl. Anl. 12). Es wird daher vermutet, daß das Anwachsen von Gefügespannungen zwischen Zuschlagskorn und Zementstein ursächlich beteiligt ist am plötzlichen Zusammenbruch unter äußerer Last stehender Leichtbetonprüfkörper in relativ späten Versuchsstadien. Entsprechende Erscheinungen wurden an Prüfkörpern aus Normalbeton nicht beobachtet.

6.7 Zusammenfassung der ermittelten Einflüsse auf das Abplatzen von Konstruktionsleichtbeton

1. Von ausschlaggebender Bedeutung ist der Feuchtigkeitsgehalt des Leichtbetons; es können hydrostatische Wasserdampfdrucke aufgebaut werden, die Betonzugspannungen hervorrufen, die die Zugfestigkeit überschreiten. Von geringerem Einfluß scheinen die durch laminare Wasserdampfströmung hervorgerufenen Betonzugspannungen zu sein.
2. Eigenzugspannungen infolge ungleichmäßiger Erwärmung des Querschnitts führen zu plötzlicher Rißbildung bis dicht unter die Betonoberfläche.
3. Oberflächennah verlegte Bewehrung führt infolge unterschiedlicher Wärmedehnung von Stahl und Beton zu zusätzlichen Betonzugspannungen.
4. Gefügedruckspannungen zwischen Leichtzuschlag und Zementstein infolge unterschiedlicher Wärmedehnung werden als mitwirkend am plötzlichen Zusammenbruch in relativ späten Versuchsstadien angesehen.

7. Schlußbetrachtungen; Folgerungen für die Praxis

Bei der Planung der vorbeschriebenen Versuchsreihe wurde erwartet, daß damit die Grenzen der Abplatzgefährdung von Elementen aus Konstruktionsleichtbeton gezogen werden könnten. Diese Erwartungen wurden nicht für alle untersuchten Fälle erfüllt. Es wurden jedoch Tendenzen deutlich, die am besten anhand der Anlagen 4 - 7 verfolgt werden können.

Unbewehrte, einseitig beflamnte Bauteile sind am wenigsten abplatzgefährdet. Schon 8 cm dicke Prüfkörper mit 5,25 Gew.-% (entsprechend ~ 7,5 Vol.-%) Feuchte zeigten unter äußerer Druckbeanspruchung von $\text{zul } \sigma$ keine Abplatzungen.

Etwas ungünstiger liegen die Verhältnisse bei unbewehrten, beidseitig beflamnten Bauteilen. Es kann jedoch gesagt werden, daß 12 cm dicke Elemente von bis zu 5,5 Gew.-% (entspr. ~ 7,5 Vol.-%) Feuchte unter äußerer Druckbeanspruchung bis zu $\text{zul } \sigma$ nicht mehr zu Abplatzungen neigen. Ein mit 8,5 Gew.-% Feuchte untersuchter Prüfkörper, der keine Abplatzungen zeigte, wird aus der Wertung bewußt ausgeschlossen.

Über bewehrte, einseitig beflamnte Elemente liegen zu wenig Versuchsergebnisse vor, um Tendenzen erkennen zu können. Sie werden sich aber nicht ungünstiger verhalten als bewehrte, zweiseitig beflamnte Bauteile.

Bei der Serie der bewehrten, beidseitig beflamnten Prüfkörper blieb ein 10 cm dickes Element bei 4,25 Gew.-% Feuchte und äußerer Druckbeanspruchung von $\text{zul } \sigma$ abplatzungsfrei. Zwei 12 cm dicke Körper mit 3,75 Gew.-% Feuchte und äußerer Druckbeanspruchung von 0,5 $\text{zul } \sigma$ brachen erst in späten Versuchsstadien plötzlich zusammen. Mit diesen Daten nähert man sich den Grenzen der Abplatzgefährdung. Zur Erhärtung seien Ergebnisse einer Versuchsserie über das Verhalten der Biegedruckzone von Stahlleichtbetonbalken unter Brandbeanspruchung [19] herangezogen. Alle dort untersuchten Prüfkörper zeigten keine Abplatzungen.

Tafel 7: Daten von untersuchten Stahlleichtbetonbalken ohne Abplatzungen

Festigkeits- klasse	Trockenroh- dichte ρ_{tr} (t/m ³)	Abmessungen b/d (cm)	Betonrandspg. i. Gebrauchs- zustand σ_R (kp/cm ²)	Feuchte	
				Gew.-%	Vol.-%
LBn 250	1,27	12/24	- 66 bis - 132	2,5	3,2
		15/30	- 67 bis - 132	4,0	5,1
		20/40	- 101 bis - 162	5,0	6,4

Die vorher beschriebene Tendenz wird durch diese Versuche bestätigt.

Obgleich bei diesen Versuchen eine andere Form der Druckzone vorlag (Biegebeanspruchung), können sie zur Beurteilung des Abplatzverhaltens herangezogen werden, zumal es sich in der Mehrzahl der in der Praxis interessanten Fälle gleichfalls um überwiegend auf Biegung beanspruchte Bauteile handelt.

Es bestehen keine Bedenken, Bauteile, deren kleinste Abmessung

≥ 12 cm bei $f \leq 2,5$ Gew.-% bzw.

≥ 15 cm bei $f \leq 4,0$ Gew.-% als

nicht abplatzgefährdet anzusehen.

Das Wertepaar $b = 20 \text{ cm}/f = 5,0$ Gew.-% liegt vermutlich weit auf der sicheren Seite.

Eine Extrapolation nach Abmessungen < 12 cm läßt sich nicht durchführen.

Die in Tafel 7 angegebenen Feuchtigkeitsgehalte wurden gemessen nach etwa eineinhalbjähriger Lagerung der Balken in einer überdachten, beheizten Halle, die etwa das Normklima 20/65 aufwies.

Angaben über die in Bauwerken verschiedener Nutzung und damit verschiedener klimatischer Bedingungen zu erwartende Ausgleichsfeuchte zu machen, bereitet zum augenblicklichen Zeitpunkt Schwierigkeiten. Die Richtlinien [8] setzen für das Berechnungsgewicht einen Wassergehalt von 5 Vol.-%, entspr. 2,5 bis 5,0 Gew.-% an. Gezielte Untersuchungen werden derzeit in den Niederlanden vorbereitet.

Die einzigen jetzt verfügbaren Untersuchungen wurden vom Institut für Technische Physik, Stuttgart, an Leca-Außenwänden wirklicher Bauwerke durchgeführt [20]. Der praktische Feuchtigkeitsgehalt - in 90 % aller Fälle nicht überschritten - solcher Wände wurde zu 4,7 Vol.-% (hier = 4,7 Gew.-% bei $\rho = 1,0$) ermittelt. Alle Wände waren mindestens zwei Jahre alt. Ausgeschlossen aus der Wertung wurden Wände mit keramischer Verkleidung, die weit ungünstigere Ergebnisse zeigten sowie Betone größerer Rohdichte, die ebenfalls durchweg höhere Werte aufwiesen.

Dasselbe Institut führt z. Z. Langzeitversuche an Außenwänden aus Konstruktionsleichtbeton durch. Nach mündlicher Mitteilung sind dabei keine besseren Ergebnisse zu erwarten als seinerzeit bei den Leca-Wänden.

Nach Stand der Dinge ist es heute noch nicht möglich, generell gültige Richtlinien zu geben für das Konstruieren mit Konstruktionsleichtbeton im Hinblick auf das Abplatzverhalten unter Brandbeanspruchung. Vielmehr muß in jedem speziellen Falle zunächst abgeschätzt werden, welchen Umweltbedingungen das Bauteil ausgesetzt sein wird und ob hohe oder geringe Ausgleichsfeuchte zu erwarten ist.

Erst danach können anhand der hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse die erforderlichen Mindestabmessungen der Querschnitte bestimmt werden.

Verzeichnis der Literatur

- [1] Krampf, L.: "Grundlagenversuche zum Verhalten von Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung bei Verwendung als Konstruktions- oder Vorsatzbeton unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse beim Schutzbau", Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1969.
- [2] Krampf, L.: "Grundlagenversuche zum Verhalten von Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung bei Verwendung als Konstruktions- oder Vorsatzbeton unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse beim Schutzbau; 2. Teil", Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1970.
- [3] Meyer-Ottens: "Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung", Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1972.
- [4] Weigler, H., und Karl, S.: "Eigenschaften derzeit verfügbarer Leichtzuschläge und ihre Bedeutung für die Herstellung und die Eigenschaften von Stahlleichtbeton", Betonsteinzeitung, Heft 9/1971.
- [5] Romberg, H.: "Einfluß der Zementart auf die Porengrößenverteilung im Zementstein", Tonindustrie-Zeitung 95 (1971), Nr. 4.
- [6] Waubke, N.V.: "Untersuchungen über Dichte, Porosität und Oberflächenbeschaffenheit von Betonleichtzuschlägen", Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1968, (nicht veröffentlicht).
- [7] "Manuel de calcul CEB-FIP "Structures en bétons légers", Bulletin d'information Nr. 85, vorläufige Fassung, März 1972.
- [8] Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Fassung Oktober 1972.
- [9] Heufers, H.: "Stahlleichtbeton, Spannleichtbeton", Zementtaschenbuch 1972/73.

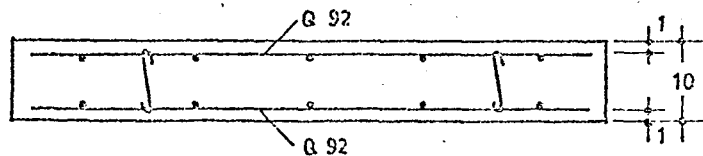
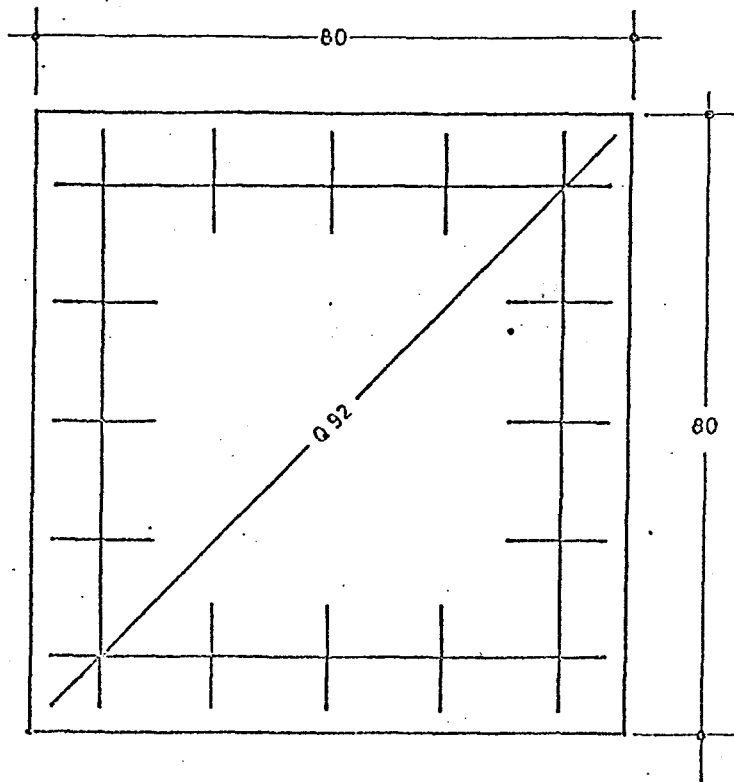
- [10] Harmathy, T.Z.
u. Berndt, J.E. : "Hydrated Portland Cement and Lightweight Concrete
at Elevated Temperatures",
Journal of the American concrete institute, Januar 1968
- [11] Timoshenko, J.: "Strength of Materials, Part II: Advanced Theorie and
Problems", Princeton, 1956.
- [12] Waubke, N.V.: "Transportphänomene in Betonporen",
Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1968
- [13] Kennedy, G.W.: "Pressure-Volume-Temperature Relations in Water at
Elevated Temperatures and Pressures",
Am. Journal of Science, 248 (1950), S. 540 - 564.
- [14] Bache, H.H.,
u. Isen, J.C.: "The Resistance of Concrete to Pop-out Formation",
BFL internal report, Karlstrup, 1967.
- [15] Schellmann, W.,
u. Fastabend, H.: "Über den Blähvorgang bei Tonen", Geologisches Jahr-
buch 82, September 1963.
- [16] Schellmann, W.,
u. Fastabend, H.: "Laboratoriumsuntersuchungen zur Beurteilung von
Bläh-tonen", Ziegelindustrie 25 (1972), 1 - 8.
- [17] Wischers, G.: "Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit
von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen
verschiedener Wärmedehnung", Dissertation Technische
Hochschule Aachen, 1961.
- [18] Locher, F.W.,
u. Wischers, G.: "Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins",
Zementtaschenbuch 1972/73.
- [19] Krampf, L.: "Das Verhalten der Biegedruckzone von Stahlleicht-
betonbalken unter Brandbeanspruchung",
Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahl-
betonbau der Technischen Universität Braunschweig,
August 1973.
- [20] Gertis, K.: "Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in
Außenwänden aus Leca-Beton",
Institut für Technische Physik, Stuttgart/Holzkirchen,
Juli 1965.

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	Bewehrungsplan
Anlage 2	Bewehrungsplan
Anlage 3	Versuchsaufbau
Anlage 4	Versuchsergebnisse: unbewehrt, einseitig beflammt
Anlage 5	Versuchsergebnisse: unbewehrt, beidseitig beflammt
Anlage 6	Versuchsergebnisse: bewehrt, einseitig beflammt
Anlage 7	Versuchsergebnisse: bewehrt, beidseitig beflammt
Anlage 8	Temperatur im Querschnitt zum Zeitpunkt des Versagens; Versuchskörper 23
Anlage 9	Dampfdruck-Kurve und Isochoren des Wassers im Temperatur- Druckdiagramm
Anlage 10	Entstehung von Pop-outs durch Porendruck
Anlage 11	Verhältnis von hydrostatischem Porendruck zu Betonzug- spannungen gegenüber Abstand zur Oberfläche zu Poren- durchmesser
Anlage 12	Kraftübertragung in Leichtbeton

Verzeichnis der Bilder

Bild 1	Belastungsrahmen
Bild 2	Prüfkörper 10 nach dem Brandversuch
Bild 3	Prüfkörper 11 nach dem Brandversuch
Bild 4	Prüfkörper 11 nach dem Brandversuch
Bild 5	Prüfkörper 12 nach dem Brandversuch
Bild 6	Prüfkörper 13 nach dem Brandversuch
Bild 7	Prüfkörper 14 nach dem Brandversuch
Bild 8	Prüfkörper 16 nach dem Brandversuch
Bild 9	Prüfkörper 16 nach dem Brandversuch
Bild 10	Prüfkörper 17 nach dem Brandversuch
Bild 11	Prüfkörper 17 nach dem Brandversuch
Bild 12	Prüfkörper 18 nach dem Brandversuch
Bild 13	Prüfkörper 18 nach dem Brandversuch



\int
 41 66

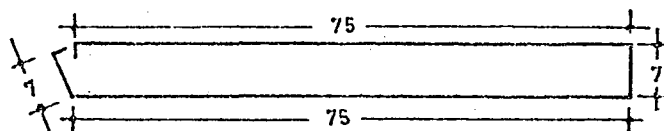
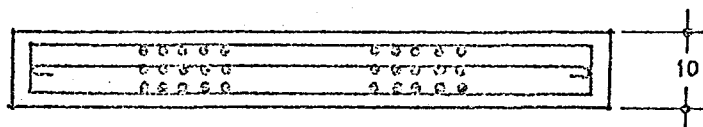
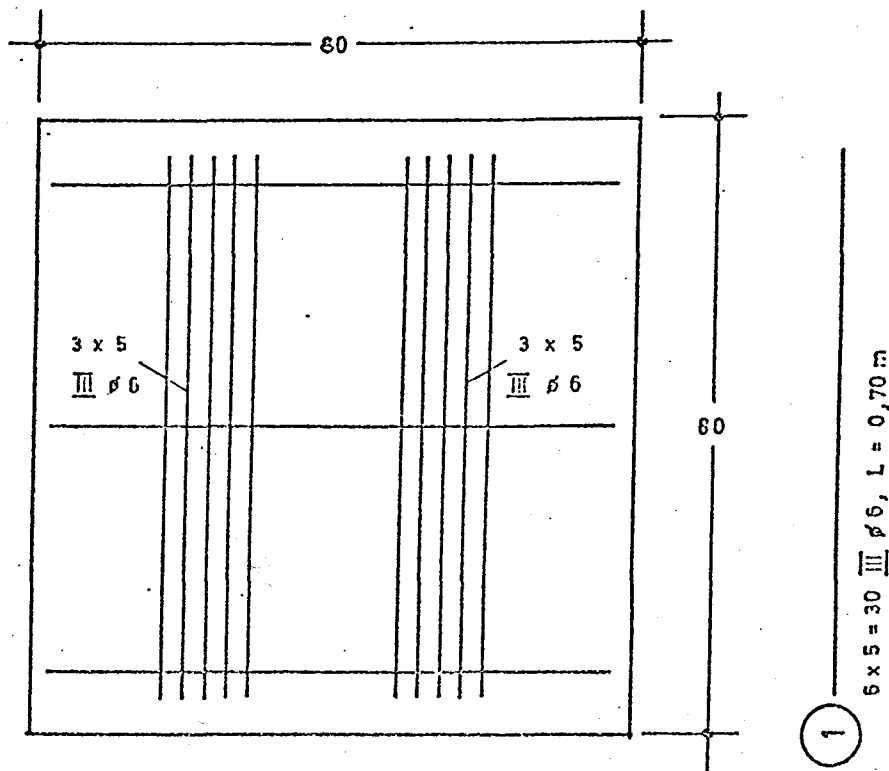
Bewehrungsplan

Versuchskörper
10, 11, 13, 14, 18, 19

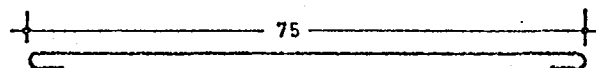
Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung; 3. Teil

Anlage 1

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
 Technische Hochschule Braunschweig
 Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



3 III ϕ 6, L = 1,75 m



3 III ϕ 6, L = 0,25 m

Bewehrungsplan

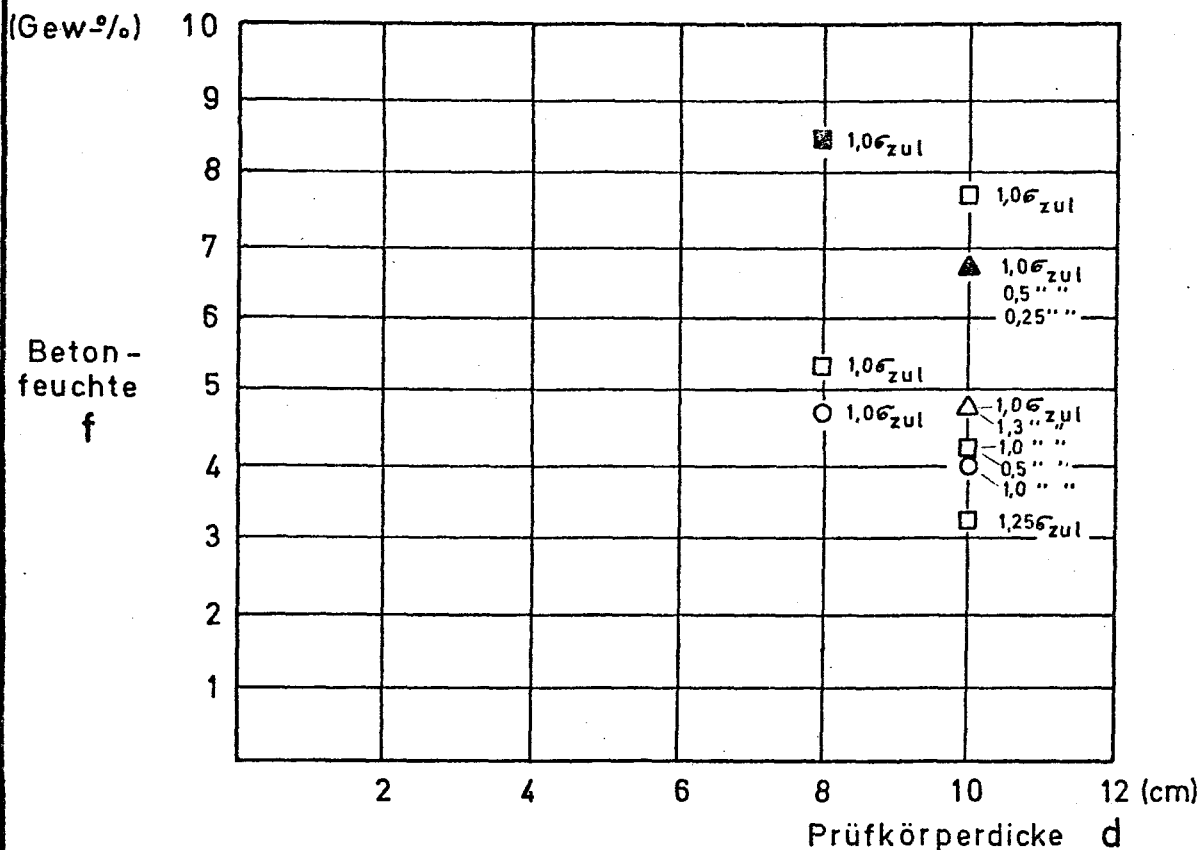
Versuchskörper
12, 15, 16, 17, 20

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung ; 3. Teil

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 2

unbewehrt-einseitig beflammt



Legende:

- Norlit, keine Ablplatzungen
- Norlit, Ablplatzungen
- △ detoon, " " " " " "
- ▲ detoon, " " " " " "
- Leca, " " " " " "

Beispiel:

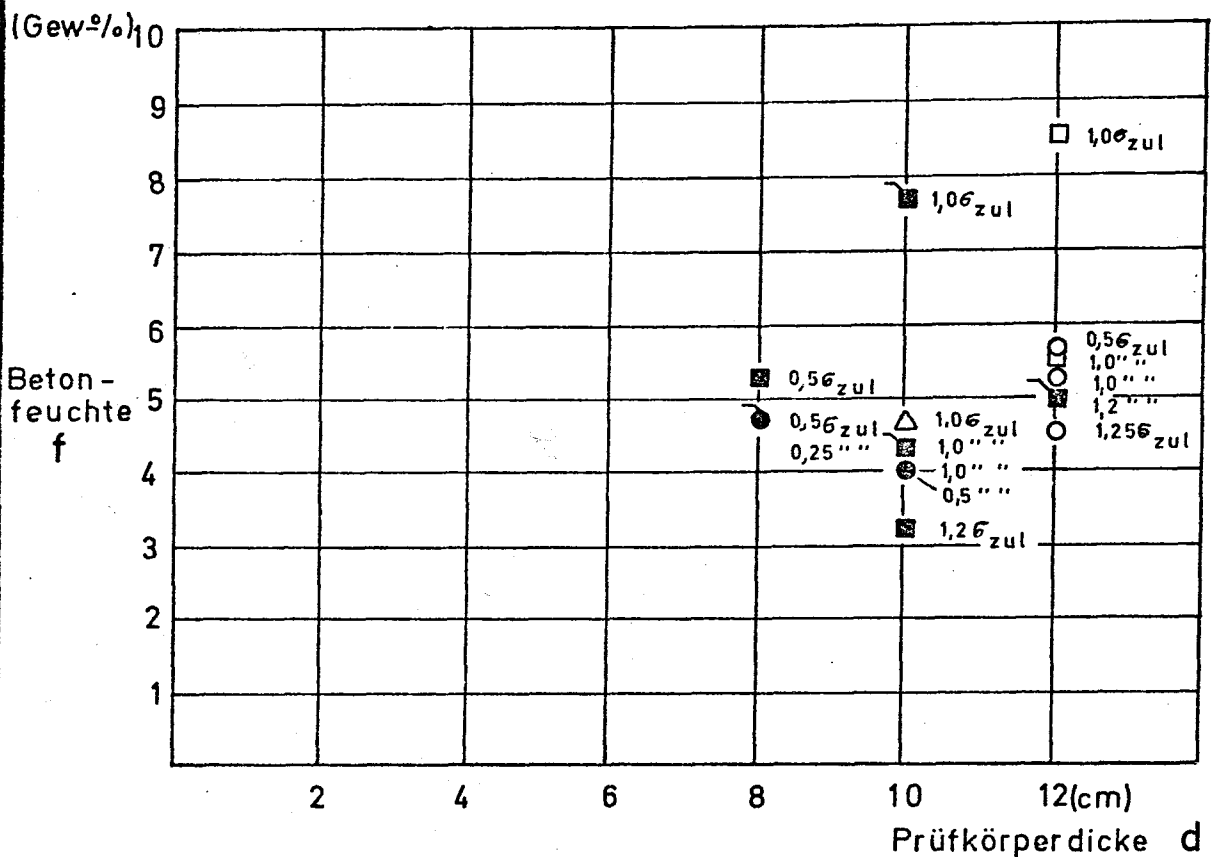
▲0,5σ_{zul} bedeutet: detoon-Prüfkörper, geprüft unter aufgebrachter Druckspg. von 0,5σ_{zul}, zeigte Ablplatzungen

Versuchsergebnisse an Leichtbetonkörpern
unbewehrt, einseitig beflammt

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung 3. Teil

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 4

unbewehrt – beidseitig beflammt

Legende:

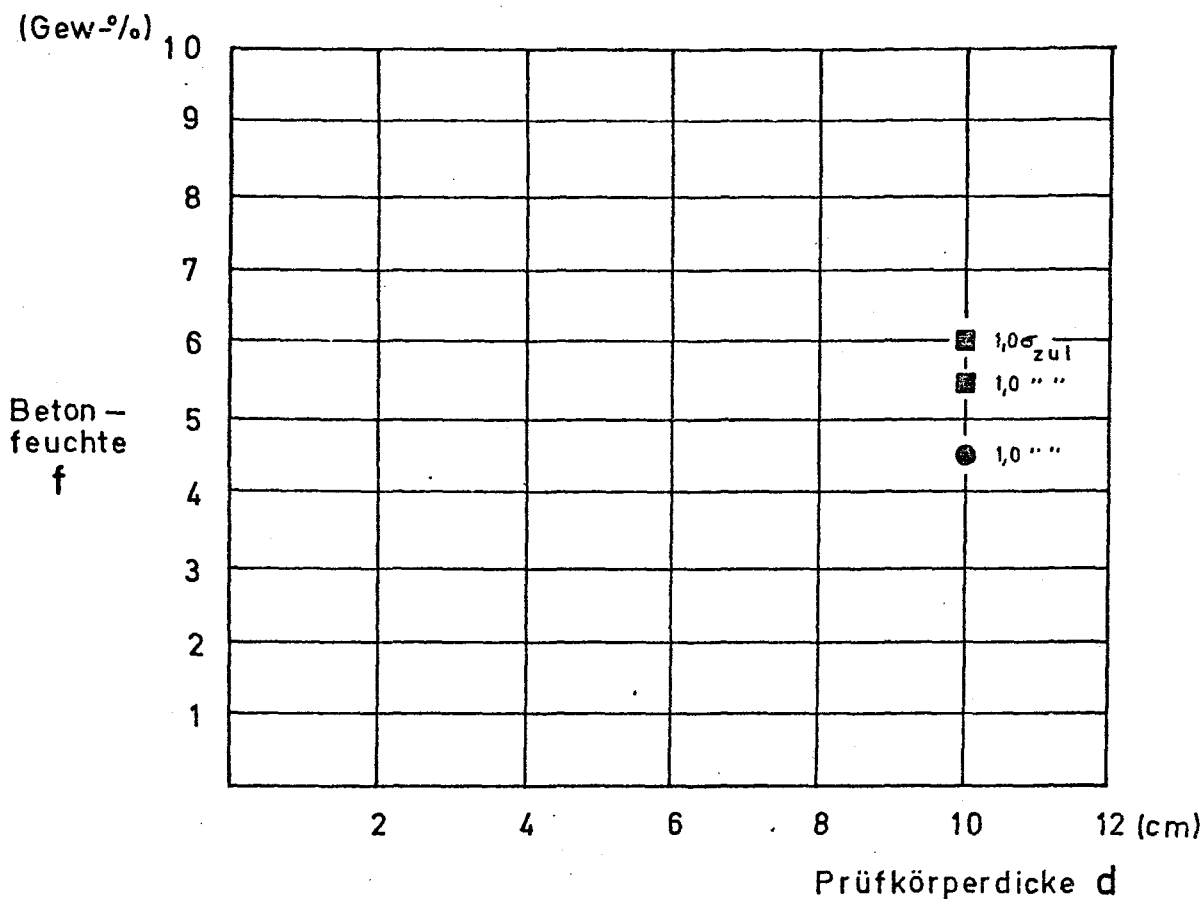
☐ Norlit, keine Abplatzungen ☒ Norlit, Abplatz g. ☒ Norlit, pl. Zusammenbr
☐ Leca, " " " ☒ Leca, " " " ☒ Leca, " " "
 detoon, " " " detoon, " " " detoon, " " "

Beispiel:

● 0,56_{Zul} bedeutet: Leca-Prüfkörper, geprüft unter aufgebrachtener Druckspg. von 0,56_{Zul}, zeigte Abplatzungen.

Versuchsergebnisse an Leichtbetonkörpern unbewehrt, beidseitig beflammt	
Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung 3. Teil	Anlage 5
<i>Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau: Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen</i>	

bewehrt – einseitig beflammt



Legende:

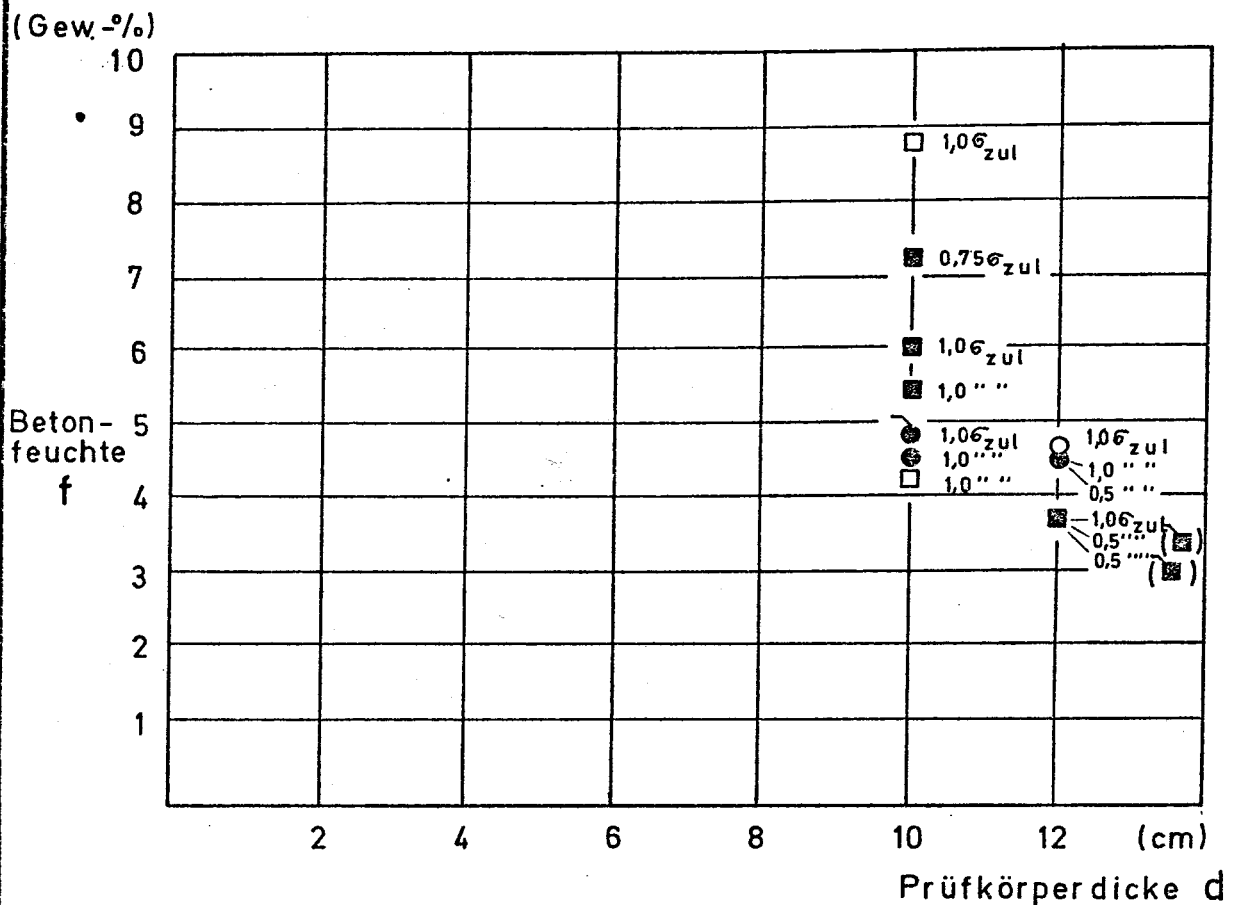
- Norlit, Abplatzungen
- Leca, " " "

Beispiel:

■ 1,0σ_{zul} bedeutet: Norlit-Prüfkörper geprüft unter aufgebracht
Druckspg. von 1,0σ_{zul} zeigte Abplatzungen

Versuchsergebnisse an Leichtbetonkörpern bewehrt, einseitig beflammt	
Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung 3. Teil	Anlage 6
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

bewehrt -beidseitig beflammt



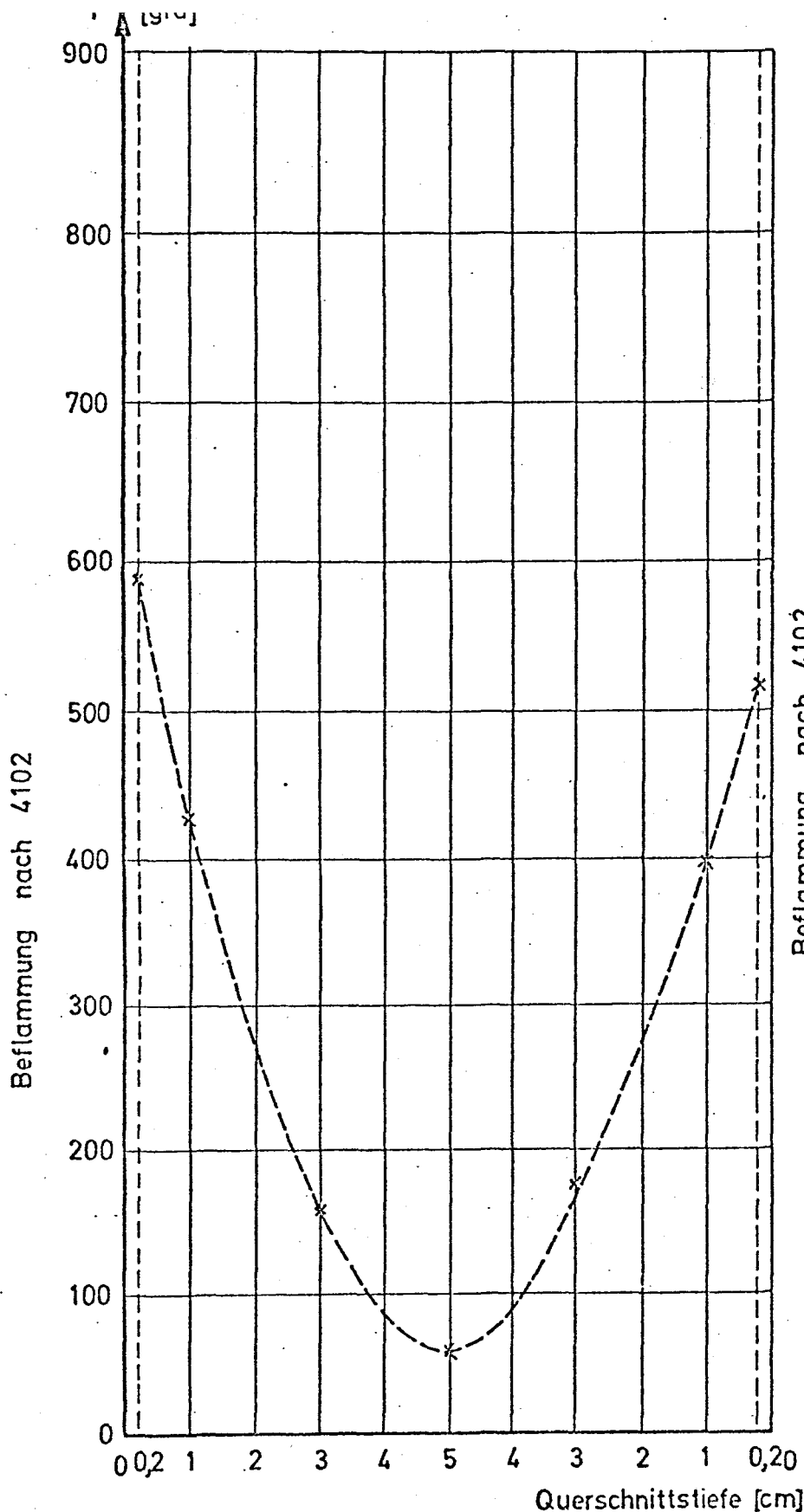
Legende:

☐ Norlit, keine Abplatzg. ☒ Norlit, Abplatzg. ☒ Norlit, plötzl. Zusammenbr.
☐ Leca, " " " ☒ Leca, " " ☒ Leca, " " " "

Beispiel:

● 1,06_{Zul} bedeutet : Leca -Prüfkörper, geprüft unter aufgebracht
Druckspg. von 1,06_{Zul} zeigte Abplatzungen.

Versuchsergebnisse an Leichtbetonkörpern bewehrt, beidseitig beflammt	
Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung 3. Teil	Anlage 7
<i>Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau</i> <i>Technische Universität Braunschweig</i> <i>Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen</i>	



Brandraumtemperatur
zum Zeitpunkt des
Versagens 810 grad

t = 26 min

Beflammung nach 4102

Zuschlagstoffe :
Blähschiefer
0-25 mm
ohne Natursand

Betonrohddichte :
 $\rho_{tr} = 1,39 \text{ t/m}^3$

Feuchtigkeit:
3,30 Gew. %

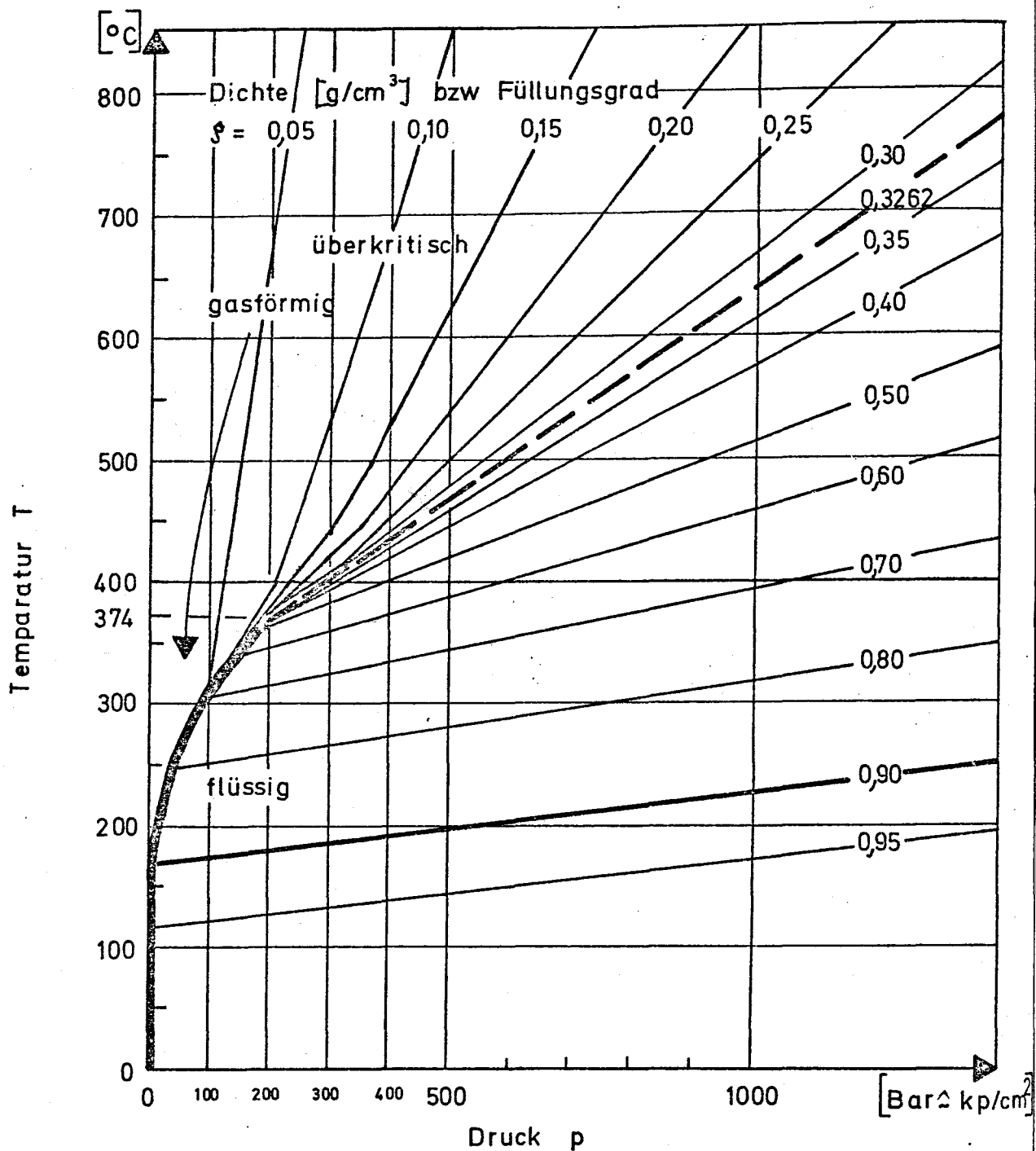
Temperatur im Querschnitt zum Zeitpunkt
des Versagens

Versuchskörper 23

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung

Anlage 8

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

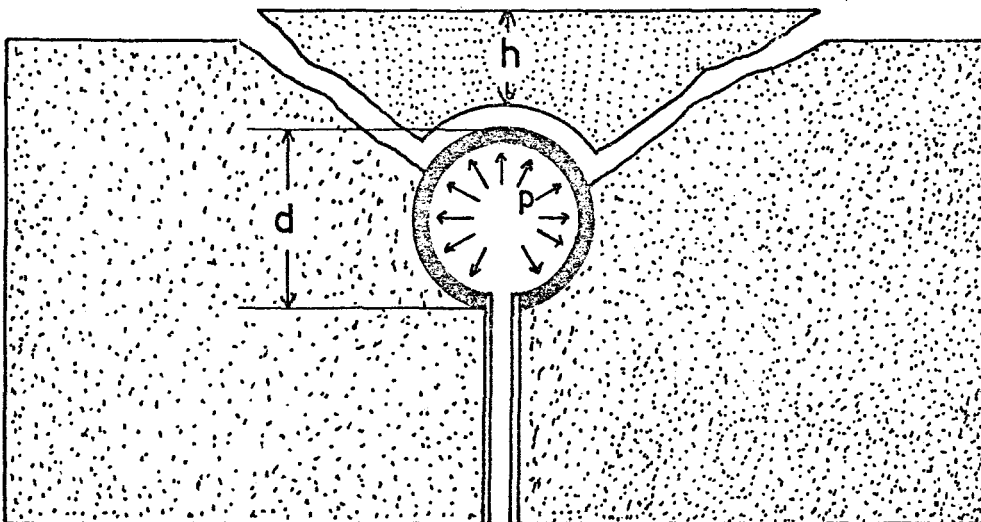


Dampfdruck -Kurve und Isochoren des Wassers
im Temperatur -Druckdiagramm (nach Kennedy)

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 9

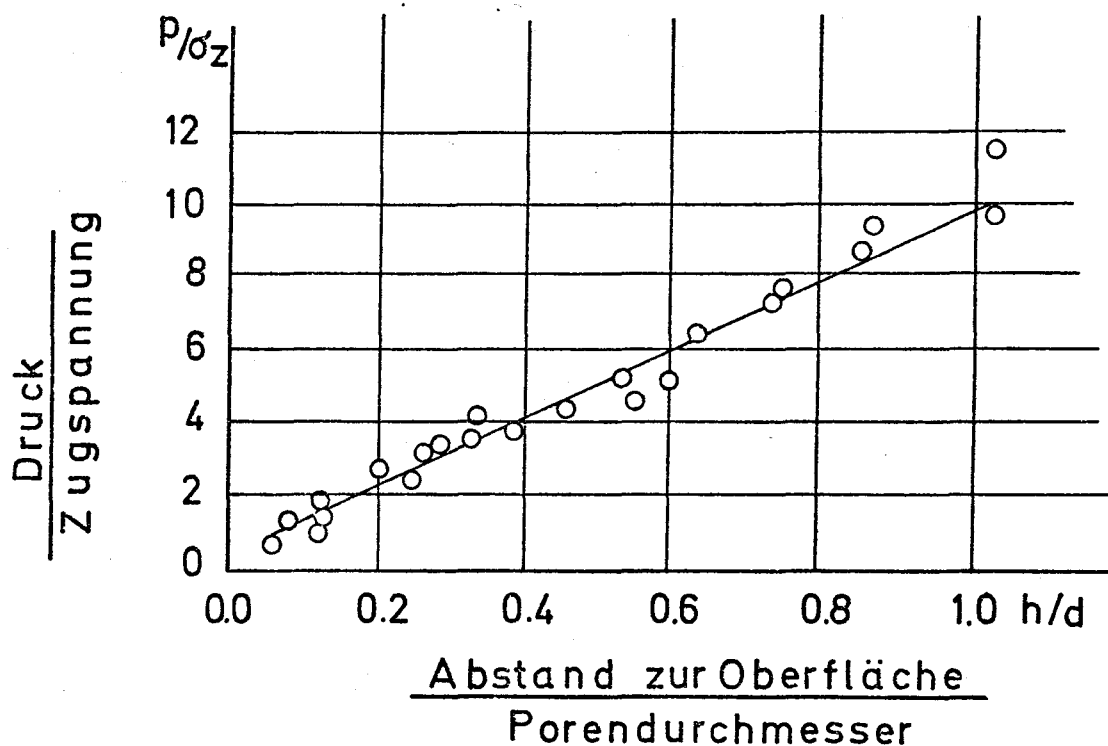


Entstehung von „Pop-Outs“ durch
Porendruck p (nach Bache und Isen)

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfstelle für das Bauwesen

Anlage 10

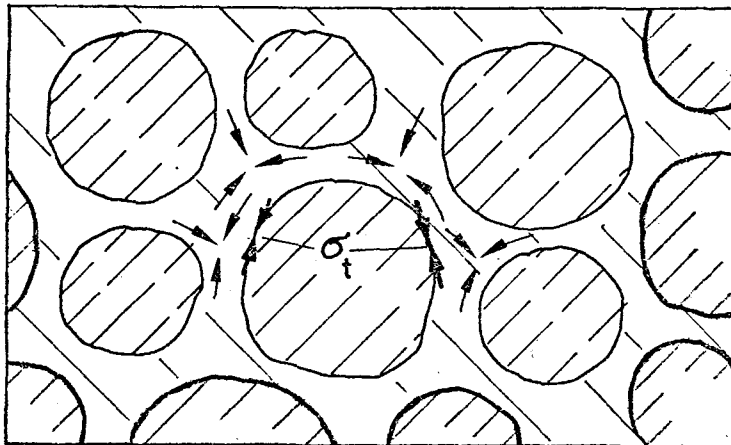


Verhältnis von hydrostat. Porendruck P zu Betonzugspg. σ_z gegenüber Abstand h zur Oberfläche zu Porendurchmesser d (nach Bache und Isen)

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton unter Brandbeanspruchung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 11

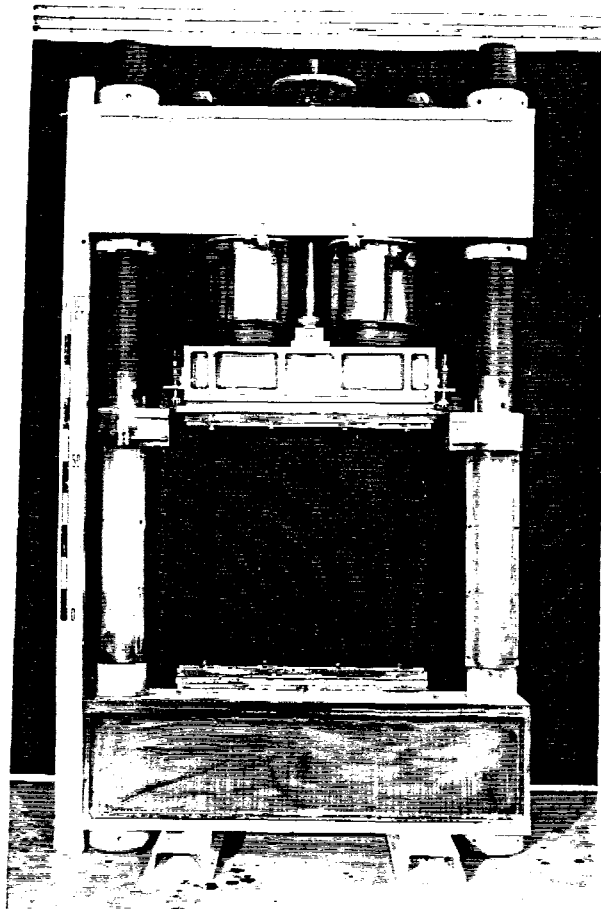


Kraftabtragung in Leichtbeton

Grundlagenversuche: Konstruktionsleichtbeton
unter Brandbeanspruchung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

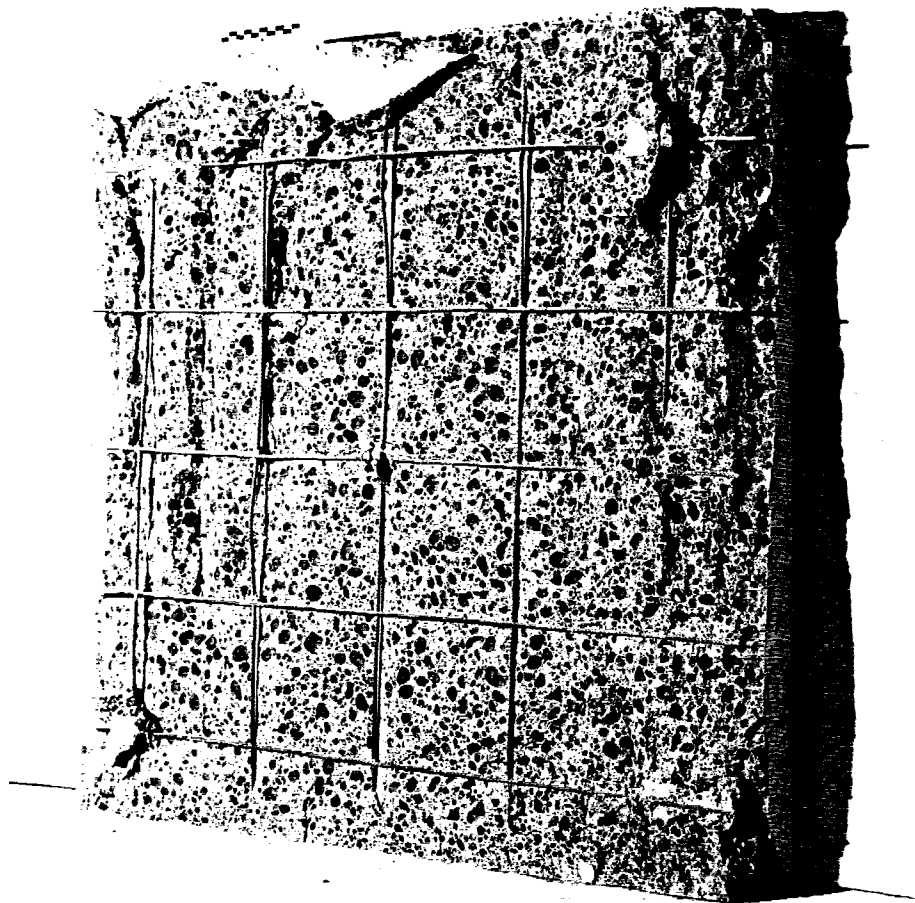
Anlage 12



Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Belastungsrahmen

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

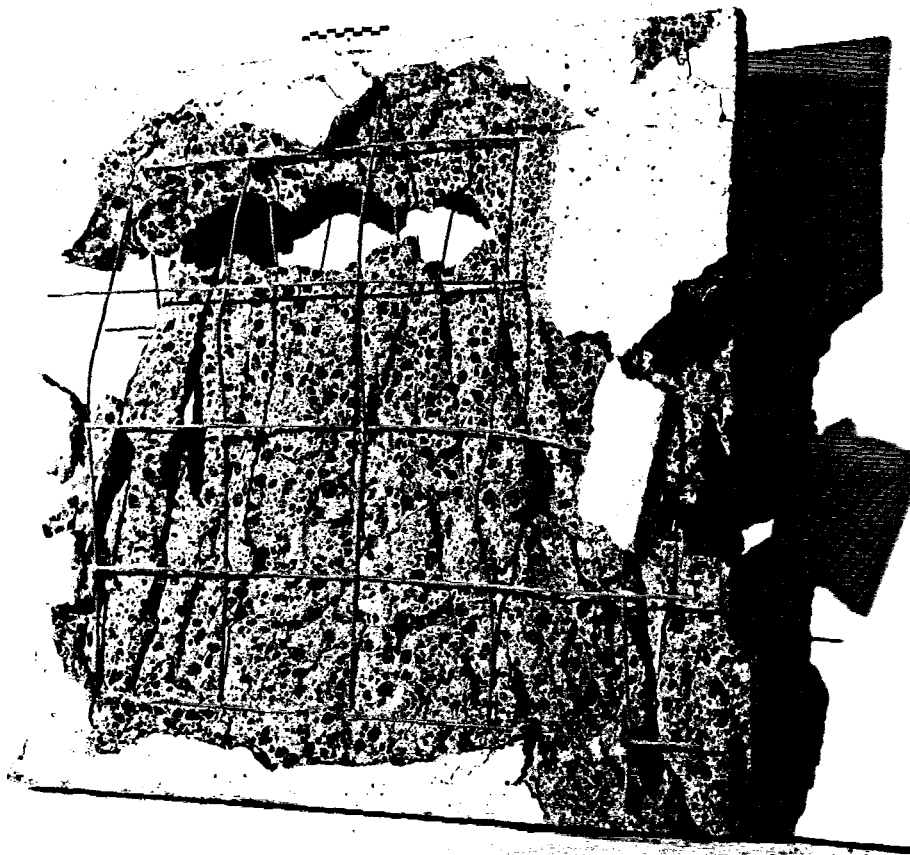
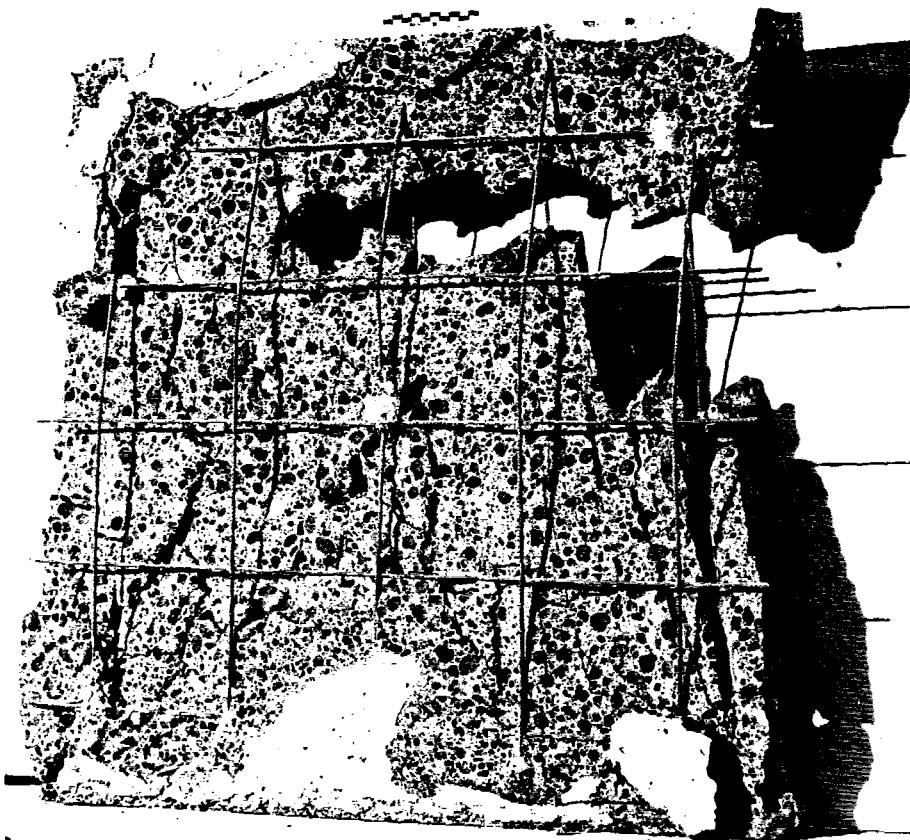
Bild 1



Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 10 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Bild 2

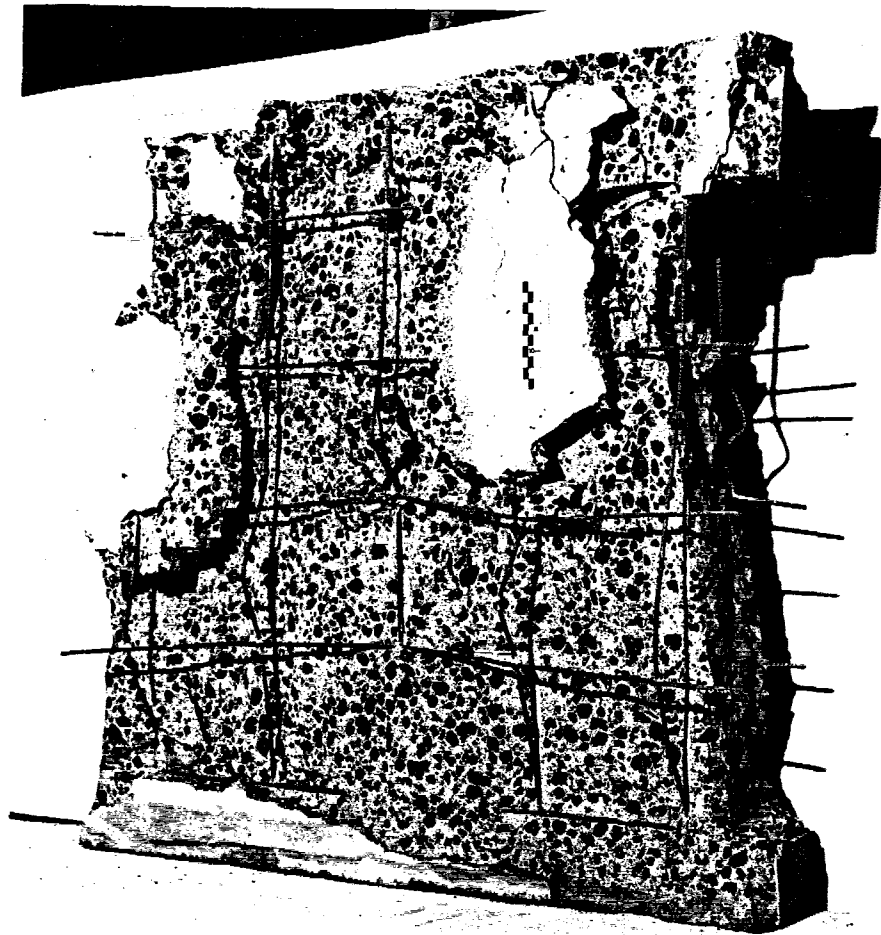


Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 11 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Bilder
3 u. 4

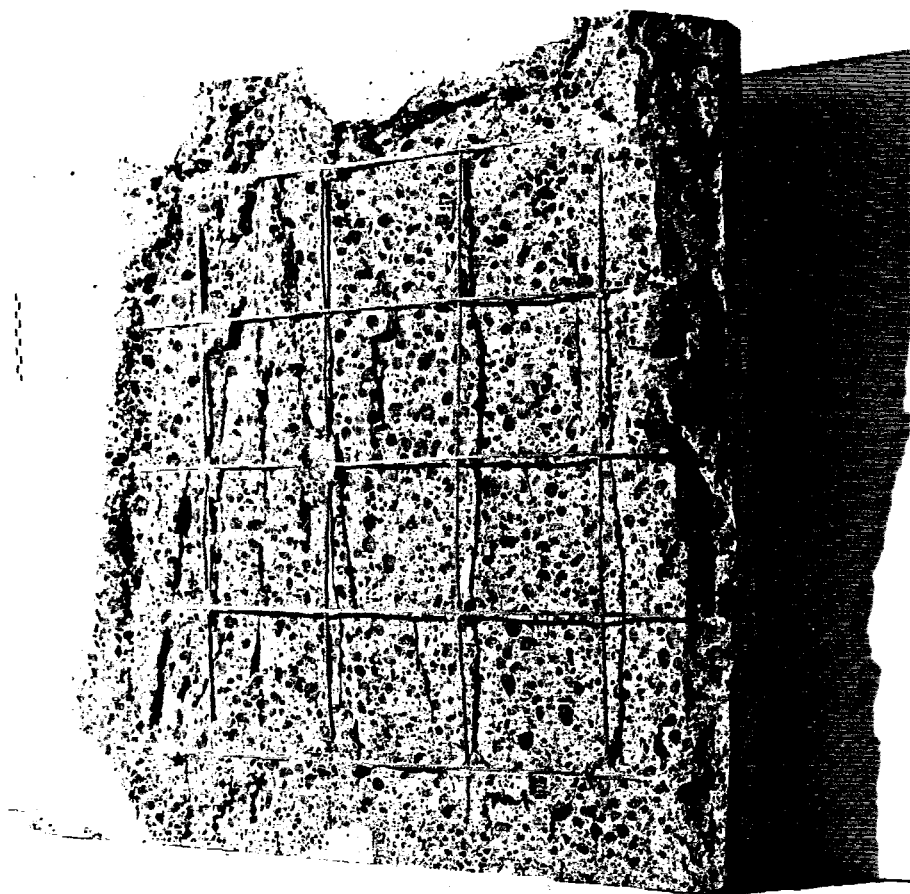
Dr. Gert Wittenberg 07/82



Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 13 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen


Bild 6

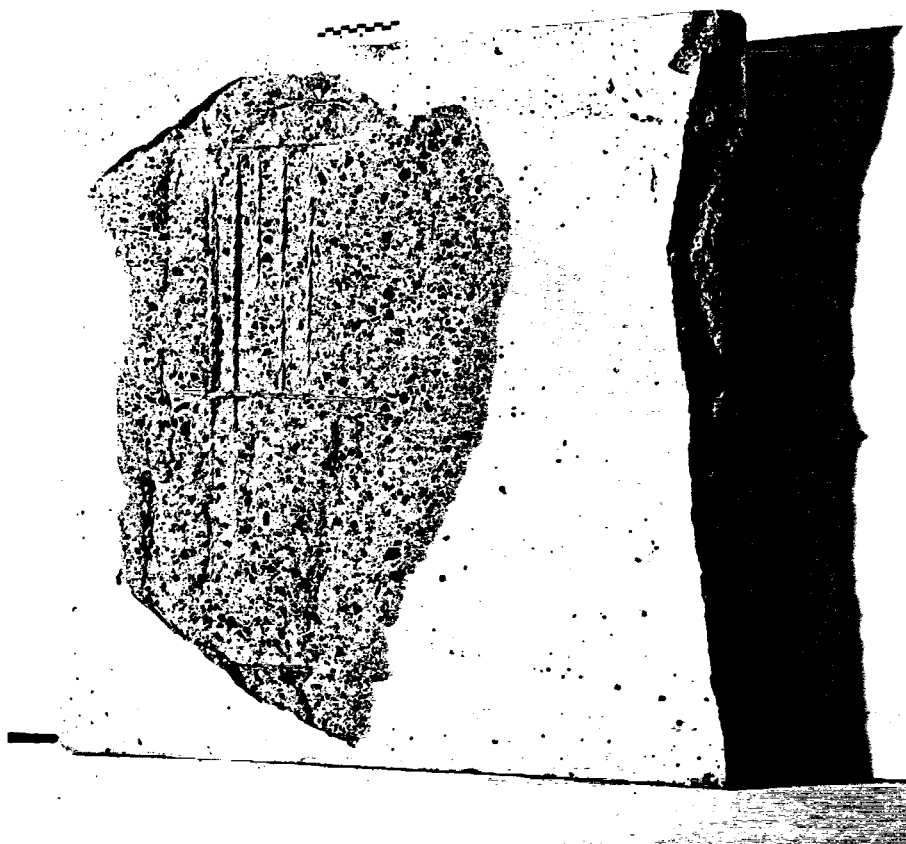
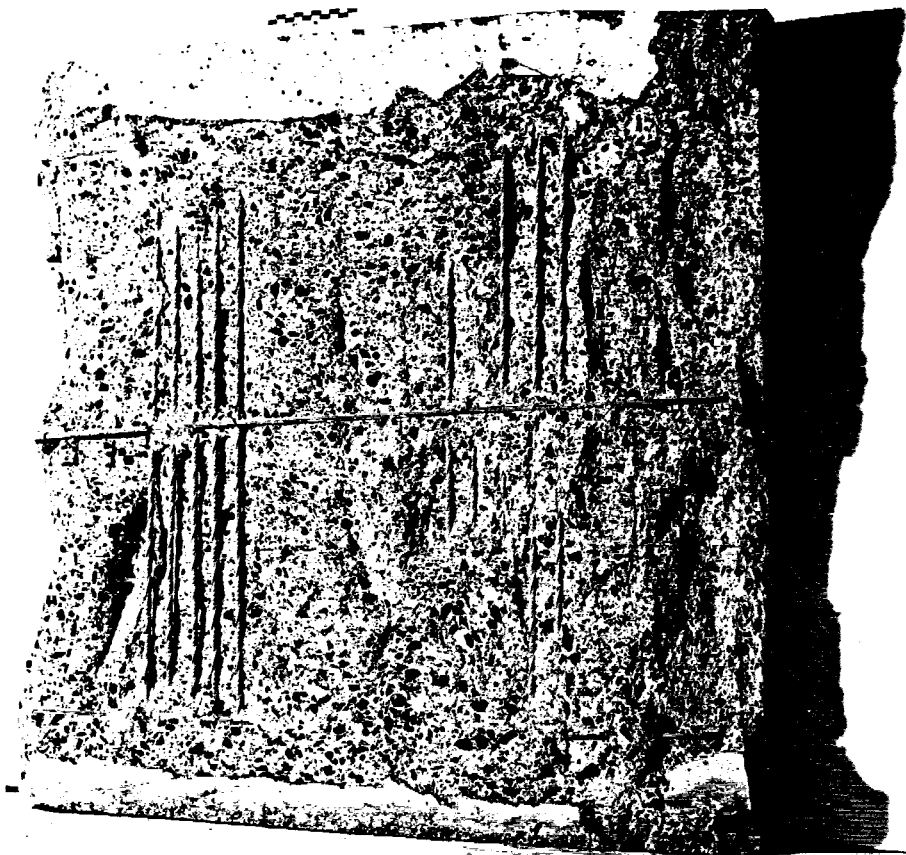


Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 14 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Bild 7

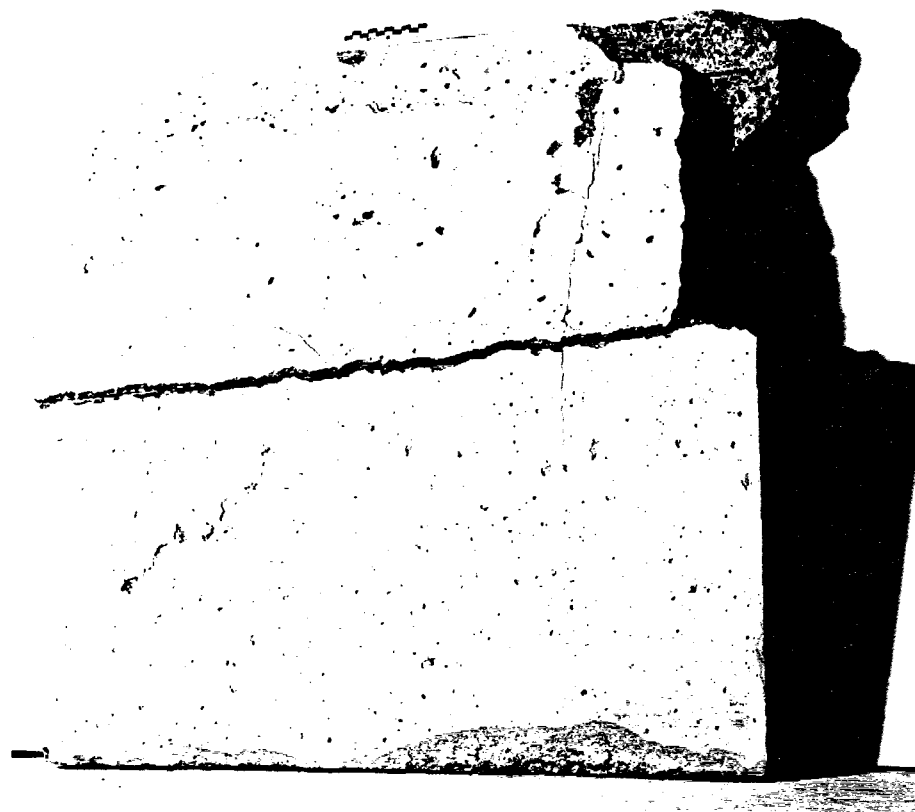
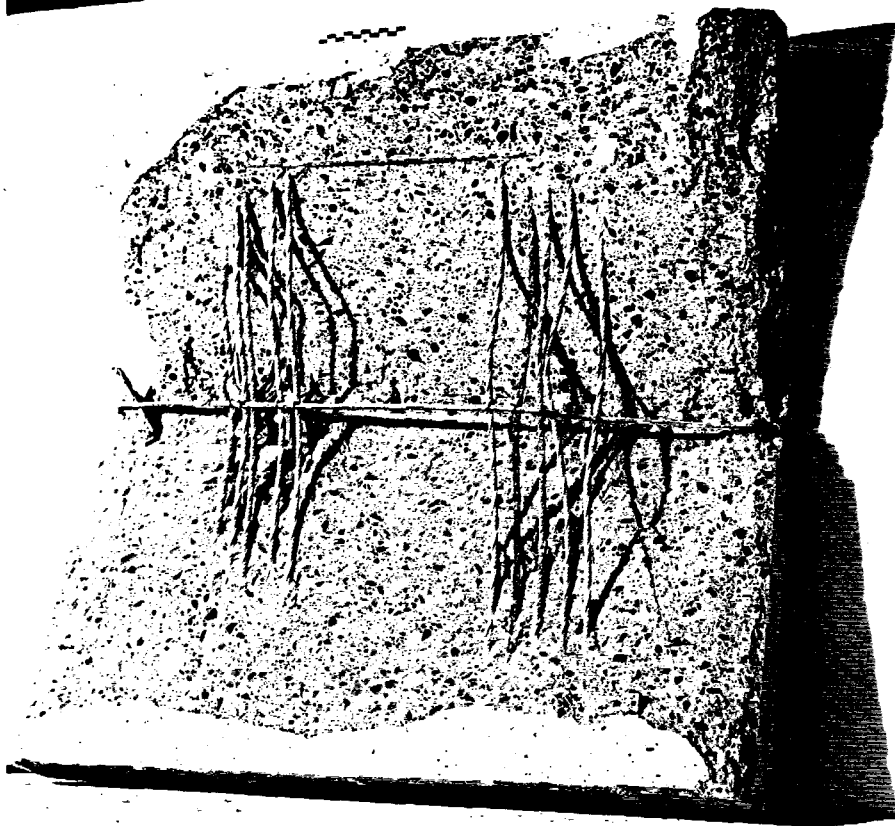
 Gebr. Widmann 978 69



Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 16 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

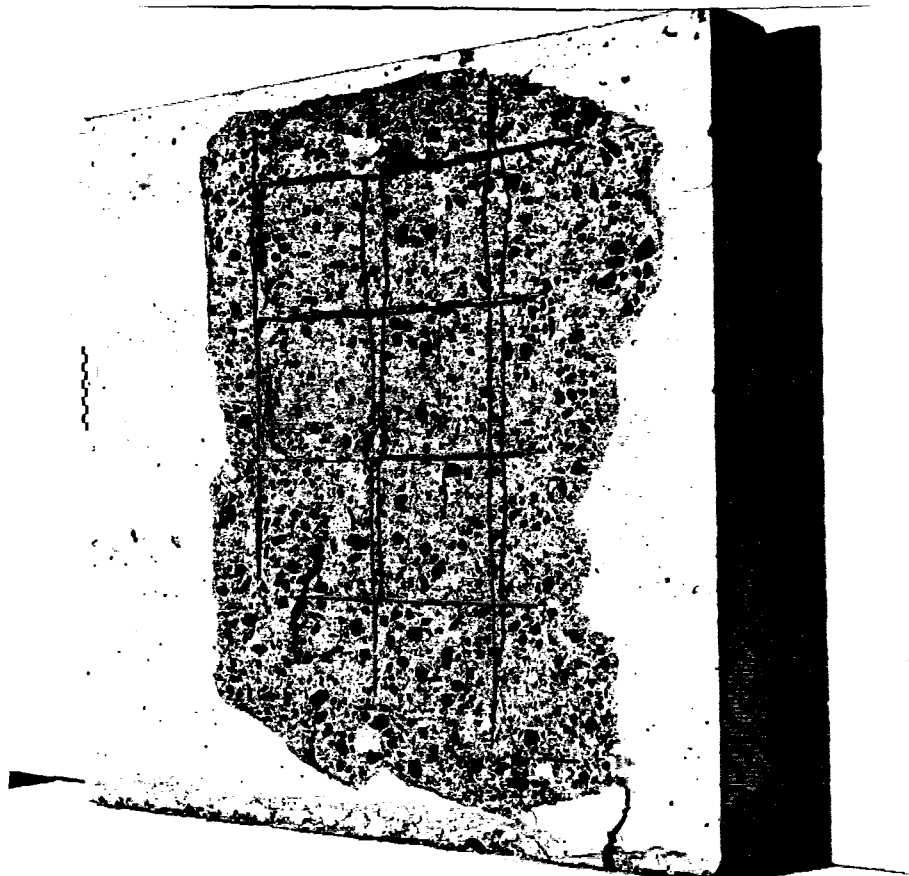
Bilder
8 u. 9



Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 17 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Bilder
10 u. 11



Konstruktionsleichtbeton 3. Teil
Prüfkörper 18 nach dem Brandversuch

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Bilder
12 u. 13

© Gehr. W. Dörner 1982